

ІНТЕГРАЦІЯ АЕРОКОСМІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У СИСТЕМУ УПРАВЛІННЯ ЕКОЛОГІЧНОЮ БЕЗПЕКОЮ: РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИКОРИСТАННЯ АЕРОКОСМІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ЕКОЛОГІЧНОЮ БЕЗПЕКОЮ ПЛАНОВОЇ ДІЯЛЬНОСТІ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В УМОВАХ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ПРИРОДНОГО ХАРАКТЕРУ

Машков О.А., Іващенко Т.Г., Печений В.Л.

Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, 03035, м. Київ
mashkov_oleg_52@ukr.net, tvn.prof@gmail.com

Здійснено аналіз наявних систем підтримки прийняття рішень в інтегрованих автоматизованих системах управління екологічною безпекою. Зазначено, що формування інтегрованих автоматизованих систем управління екологічною безпекою доцільно здійснювати на основі ризик-орієнтованої підтримки прийняття екологічних рішень. Запропоновано класифікацію процесів руйнівного характеру в екосистемах для застосування в інтегрованих автоматизованих системах управління екологічною безпекою планової діяльності. Обґрунтовано, що інтегровані автоматизовані системи управління екологічною безпекою варто будувати із використанням моделей та методів ризик-орієнтованої підтримки прийняття рішень в умовах виявлення екологічних загроз та ризиків. Інтегровані автоматизовані системи є відкритими складними динамічними системами, які містять сукупність природних і штучних картографічних об'єктів, серед яких виділяються певні екологічні об'єкти, що представляють цінність для людини. Окреслено необхідність прийняття рішень під час планової діяльності за короткий проміжок часу, зважаючи на динаміку ситуацій. Установлено, що застосування наявних методик оцінки екологічних загроз та ризиків, заснованих на статистичних методах із використанням імітаційних моделей, пов'язано із неприйнятною обчислювальною складністю, яка є неприпустимою у системах підтримки прийняття рішень реального часу. Визначено, що для підвищення своєчасності, обґрунтованості та ефективності рішень в інтегрованих автоматизованих системах під час здійснення підтримки прийняття рішень у реальному часі доцільно використовувати динамічні моделі екологічних загроз та ризиків на основі просторово розподіленої моделі територіальної системи та моделі процесів руйнівного характеру, що розвивається в її межах, які враховують вплив навколишнього середовища та рішення уповноваженої особи, а також забезпечують достатню деталізацію у просторі та часі. *Ключові слова:* екологічний об'єкт, екологічні збитки, екосистема, захист довкілля, інтегрована система управління екологічною безпекою, надзвичайна екологічна ситуація, планова діяльність, ризик-орієнтований підхід, система підтримки прийняття управлінських інформаційних рішень.

Integration aerospace technology in the control system of ecological safety, development of technology use of space technology for management ecological safety of planned activities support decision making in emergency situations of natural character. Mashkov O.A., Ivashchenko T.G.

The paper analyzes the existing decision support systems in integrated automated environmental safety management systems. It is determined that the formation of integrated automated environmental safety management systems should be carried out on the basis of risk-oriented support for environmental decision-making. The classification of processes of destructive character in ecosystems for application in the integrated automated control systems of ecological safety of planned activity is offered. It is substantiated that integrated automated environmental safety management systems should be built using models and methods of risk-oriented decision support in terms of identifying environmental threats and risks. Integrated automated systems are open complex dynamic systems that contain a set of natural and artificial cartographic objects, among which certain ecological objects of human value stand out. Necessity of decision-making at planned activity for the minimum time owing to high dynamics of situations is substantiated. It is established that the application of existing methods of assessment of environmental threats and risks, based on statistical methods using simulation models, is associated with unacceptable computational complexity, which is unacceptable in real-time decision support systems. It is determined that to increase the timeliness, validity and efficiency of decisions in integrated automated systems in real-time decision support, it is advisable to use dynamic models of environmental threats and risks based on the spatially distributed model of the territorial system and destructive processes. boundaries that take into account the impact of the environment and the decisions of the decision-maker, and provide sufficient detail in space and time. *Key words:* ecological object, ecological damages, ecosystem, environmental protection, integrated ecological safety management system, ecological emergency situation, planned activity, risk-oriented approach, management information decision support system.

Постановка проблеми. Проблема забезпечення безпеки життєдіяльності людини стає нині все більш актуальною. Попередження та ліквідація надзвичайних ситуацій техногенного і природного характеру з метою збереження життя та здоров'я людей, забезпечення сталого розвитку країни є одними зі склад-

ників національної безпеки держави, яку неможливо забезпечити без детального аналізу наявного стану техногенної і природної безпеки, спостереження за ним у довгостроковій динаміці та розроблення заходів, спрямованих на мінімізацію ризиків виникнення надзвичайних ситуацій (НС) [1; 2]. В основу управління екологічною безпекою планової діяльності покладено системний підхід, який оперує поняттями «екосистема», «екологічний об'єкт», «екологічний стан», «екологічний процес», «екологічна ситуація».

Проведений аналіз засвідчує, що нині створені умови для практичного вирішення задач ризик-орієнтованої системи підтримки прийняття екологічних рішень в умовах процесів руйнівного характеру у просторово-часовому масштабі. Цьому сприяє розвиток комп'ютерної техніки та інформаційних технологій, таких як геоінформаційні системи (ГІС), а також доступність геопросторових і статистичних даних за допомогою мережі Інтернет. Геопросторові відомості, що описують місцевість, онлайн-відомості про погодні умови нині є доступними для багатьох регіонів світу, а наявні моделі динаміки процесів руйнівного характеру дозволяють ефективно використовувати такі відомості.

Нині створені та експлуатуються багато систем, призначених як для вирішення задач автоматизації окремих робочих місць спеціалістів, що забезпечують управління в умовах надзвичайних екологічних ситуацій, так і для забезпечення державного, міждержавного та міжнародного управління і контролю за надзвичайними ситуаціями. Такі системи мають різні функціональні задачі: від виконання розрахункових та інформаційно-довідкових функцій до прямої підтримки прийняття управлінських рішень [3-9].

Серед процесів, які виникають у природно-техногенних системах, ми визначимо особливий клас процесів – процеси руйнівного характеру (ПРХ), за якими у контексті дослідження беруться до уваги просторово-розподілені небезпечні природні явища, які відбуваються в екологічній системі та за своєю інтенсивністю, масштабом розповсюдження і тривалістю можуть становити негативні наслідки для самої системи та її зовнішнього середовища у вигляді матеріальних збитків та порушення умов життєдіяльності людей. Тож процеси руйнівного характеру є проявом збурюючих впливів, які порушують стабільне функціонування системи.

Надзвичайна екологічна ситуація виникає за умови наявності вразливих екологічних об'єктів, що потрапляють під вплив процесу руйнівного характеру та вимагають прийняття рішень з боку особи, яка приймає рішення. Водночас надзвичайна екологічна ситуація потребує прийняття таких рішень: попередження (запобігання виникненню), запобігання розвитку, ліквідації наслідків. Для прийняття рішень потрібно вирішити такі завдання: моделювання, моніторинг, діагностика ситуації, підтримка прийняття рішень.

Тому актуальною науковою проблемою є розроблення технології використання аерокосмічних технологій для управління екологічною безпекою планової діяльності, для підтримки прийняття рішень в умовах надзвичайних ситуацій природного характеру.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Необхідність удосконалення системи управління екологічною безпекою планової діяльності та підтримки прийняття рішень в умовах надзвичайних ситуацій природного характеру зумовлена зовнішньополітичним курсом України на європейську інтеграцію і визнається цілою низкою документів стратегічного характеру. Стратегія національної безпеки України передбачає створення ефективної системи моніторингу довкілля. Задля ефективного виконання функцій державна система моніторингу довкілля має спиратися на визначені регуляторні вимоги до відповідальності визначених суб'єктів, обґрунтування програм і регламентів моніторингу, а також критерії безпеки навколишнього середовища. Система управління екологічною безпекою має забезпечувати об'єктивний аналіз впливів за результатами об'єктових програм моніторингу і контролю, а також надавати результати аналізу динаміки зміни основних складників довкілля у просторі та часі з урахуванням фонових показників забруднення.

Розроблення ефективної системи управління екологічною безпекою планової діяльності відповідає європейським і світовим підходам до екологічного управління, зокрема вимогам і директивам Угоди про асоціацію України з Європейським Союзом. Створення такої системи значно розширить можливості міжнародної співпраці України у галузі охорони навколишнього природного середовища і сприятиме приведенню стану довкілля у відповідність до європейських і світових вимог.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За результатами аналізу літературних джерел можна зробити висновок про те, що необхідність технологій для управління екологічною безпекою планової діяльності і підтримки прийняття рішень в умовах надзвичайних ситуацій природного характеру може бути досягнута за допомогою певного огрубіння (розмивання) моделі, зокрема за допомогою розроблення правдоподібної формальної моделі процесу руйнівного характеру, яка має носити наближений характер, що дозволить значно знизити вимоги до точності моделі поширення процесу руйнівного характеру без істотного її (моделі) спрощення і без втрати наочності та, відповідно, обґрунтованості оцінок для особи, яка приймає рішення.

Аналіз наукових джерел свідчить, що у переважній більшості робіт використовуються головним чином статистичні та математичні методи. Водночас побудова наближеної моделі надзвичайної екологічної ситуації вимагає застосування інтелектуальних методів, що диктується неструктурованістю про-

блемної області. Причому традиційні підходи на основі формалізму нечітких множин (fuzzy set), що характеризуються високою обчислювальною складністю, не можуть забезпечити необхідні показники швидкодії системи управління екологічною безпекою планової діяльності [4-6].

За висновками досліджень, більшість підходів до онлайн-моніторингу надзвичайної екологічної ситуації мають суттєві недоліки. Наприклад, наземні системи, що використовують статичні камери, мають неприйнятно високу вартість. Системи, засновані на використанні супутників, характеризуються низькою часовою та просторовою роздільною здатністю [8]. Пілотовані літальні апарати великі за розмірами та коштовні, вони залежать від погодних умов і потребують наявності аеродромів [7,8].

Останнім часом спостерігається прогрес у сфері використання дистанційно пілотованих літальних апаратів (ДПЛА) для моніторингу, виявлення і навіть локалізації надзвичайної екологічної ситуації [7; 8], що є можливим без участі людини. Проте спотворення отримуваних зображень унаслідок вібрацій і турбулентності, а також неможливість прямо виміряти параметри, необхідні для особи, яка приймає рішення, є недоліками цього підходу. Отже, інтеграція ДПЛА з технологіями дистанційного зондування є швидкодіючим, мобільним, дешевим та потужним вирішенням задачі управління екологічною безпекою в умовах надзвичайних екологічних ситуацій. Використання комплексу безпілотних апаратів із високотехнологічними сенсорами досліджувалося в Європейських проєктах FiRE та COMETS [9]. Незважаючи на позитивні результати, пов'язані з використанням ДПЛА, нині багато питань залишилися не досить дослідженими. Такі питання, як архітектура систем моніторингу надзвичайних екологічних ситуацій, заснованих на комплексному застосуванні аерокосмічних технологій, і відповідні системи спостереження, сенсори, алгоритми дистанційного зондування та обробки зображень потребують подальшого дослідження. Водночас такі системи управління екологічною безпекою потребують використання гібридних моделей, які поєднують наближені моделі надзвичайних екологічних ситуацій, засновані на методах штучного інтелекту і онлайн-моніторингу з використанням аерокосмічних технологій.

У статті розроблені наукові основи технології використання аерокосмічних технологій для управління екологічною безпекою планової діяльності і підтримки прийняття рішень в умовах надзвичайних ситуацій природного характеру.

Невирішена раніше частина загальної проблеми. Незважаючи на наявність певної кількості нинішніх інформаційних систем для попередження і ліквідації НС, які забезпечують інформацією про прийняття необхідних рішень, проблема розроблення систем підтримки прийняття рішень, засно-

ваних на концепції динамічної оцінки узагальненого ризику у реальному часі, не прив'язаному до конкретної території та конкретного виду надзвичайної екологічної ситуації, не отримала належної уваги і все ще залишається відкритою. Тому для вирішення цієї проблеми у статті розглянуто такі питання:

- формалізація розроблення технології використання аерокосмічних технологій для управління екологічною безпекою планової діяльності і підтримки прийняття рішень в умовах надзвичайних ситуацій природного характеру;

- аналіз наявних підходів до побудови інтегрованих автоматизованих систем під час управління екологічною безпекою;

- технологія використання аерокосмічних технологій для управління екологічною безпекою планової діяльності та підтримки прийняття рішень в умовах надзвичайних ситуацій природного характеру.

Мета дослідження полягає у викладенні методики розроблення технології використання аерокосмічних технологій для управління екологічною безпекою планової діяльності і підтримки прийняття рішень в умовах надзвичайних ситуацій природного характеру.

Результати досліджень.

1. Формалізація розроблення технології використання аерокосмічних технологій для управління екологічною безпекою планової діяльності і підтримки прийняття рішень в умовах надзвичайних ситуацій природного характеру.

Складна екосистема виконує певні функції і містить численні взаємодіючі елементи (об'єкти), унаслідок чого набуває нових властивостей. У ній виділяють структуру, зовнішню і внутрішню середовище (рис. 1). Множина взаємопов'язаних елементів, що еволюціонують у часі, трактується як динамічна система, яка у кожний момент часу має певний стан і в якій динаміка описується переходами з одного стану в інший.

За формалізації екосистеми ми робимо припущення, що елементом складної екологічної системи є динамічний екологічний об'єкт, який має власну внутрішню структуру, входи (точки прикладання зовнішніх впливів) і виходи (які характеризують його стан) (рис. 1).

Екологічним станом об'єкта у певний момент часу є сукупність значень його параметрів. Об'єкт може реагувати на зовнішні впливи зміною свого внутрішнього стану і вихідних величин або виконанням певних процесів. Екологічний процес розглядається як послідовність змін станів складної екологічної системи. Водночас будь-який вплив переводить екологічну систему з одного стану в інший.

Потрібно розрізнати зовнішні впливи, зумовлені впливом на екологічну систему зовнішнього середовища (ЗС), і впливи рішень із боку особи, яка приймає рішення (ОПР). У стабільному стані екологічна система знаходиться завдяки процесам самооргані-

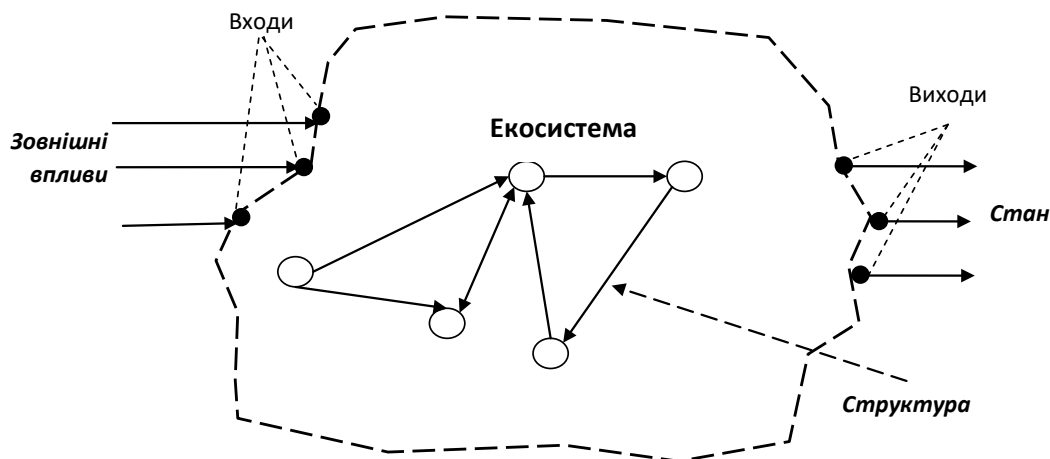


Рис. 1. Формалізація екосистеми

зації, які виявляються у самоузгодженому функціонуванні системи за рахунок внутрішніх зв'язків із зовнішнім середовищем.

У збуреному стані екологічна система потребує прийняття рішень із боку ОПР, метою яких є компенсація дії збурюючих впливів.

Прийняття управлінських екологічних рішень має спрямовуватись на зменшення руйнівного ефекту від збурюючих впливів.

Під час прийняття управлінських рішень слід ураховувати, що кожен екологічний об'єкт має певну цінність, яка динамічно змінюється в умовах надзвичайної екологічної ситуації. Тому рішення щодо захисту екологічного об'єкта засновані на оцінці ризику (потенціал здійснення небажаних і несприятливих наслідків для екологічного об'єкта в умовах надзвичайних екологічних ситуацій, які можуть виражатися зменшенням його цінності).

Для оцінки ризику екологічного об'єкта потрібно оцінити такі його складники:

- небезпека – можливість (або імовірність) виникнення надзвичайної ситуації певного типу, певної інтенсивності на певній ділянці території;
- загроза – прогностичний складник ризику на стадії матеріалізації небезпеки в умовах надзвичайної ситуації, що характеризує певний час, із плином якого цей об'єкт можливо буде охоплений процесом руйнівного характеру;
- потенційний збиток, який залежить від вразливості і функціональної стійкості екологічного об'єкта.

Рішення щодо захисту екологічного об'єкта мають бути засновані на оцінці ризику, тобто метою процесу управління екологічною безпекою є переведення природно-техногенної системи у цільовий стан із мінімальним ризиком для екологічного об'єкта.

Під час управління екологічною безпекою планової діяльності і підтримки прийняття рішень в умовах надзвичайних ситуацій природного характеру ми враховуємо, що процеси руйнівного характеру в умовах надзвичайних екологічних ситуацій харак-

теризуються значною невизначеністю. Водночас на динаміку надзвичайної екологічної ситуації впливають різні чинники, зв'язки і параметри, ступінь впливу і взаємодії яких не можуть бути чітко визначеними і врахованими із достатньою повнотою [4]. Вхідні параметри надходять із різних джерел. Більшість параметрів неможливо або дуже складно точно виміряти. Зазвичай уявлення ОПР про причини і можливі способи зміни ситуації є розмитими, нечіткими і суперечливими. Окрім того, ПРХ є швидкоплинним процесом, який характеризується мінливістю характеру свого перебігу, що вимагає врахування його динаміки і формування прогнозів щодо розвитку надзвичайної екологічної ситуації. Неможливість багаторазового спостереження ПРХ в однакових умовах ускладнює застосування для нього відомих статистичних методів.

Особливостями надзвичайної екологічної ситуації є руйнівний характер, просторове поширення, невизначеність; швидкоплинність, що потребує прийняття рішень в умовах ліміту часу; неможливість багаторазового спостереження в однакових умовах.

Ураховуючи особливості надзвичайної екологічної ситуації, використання методів математичного моделювання (зокрема статистичних методів) для його опису не представляється можливим. Унаслідок зазначених вище особливостей процес поширення ПРХ складно моделювати і прогнозувати. Окрім того, важким для формалізації є процес підтримки прийняття рішень в умовах надзвичайної екологічної ситуації, від швидкодії якого залежать не тільки розміри економічних та екологічних збитків, але і життя та здоров'я людей.

ОПР доводиться приймати рішення в умовах невизначеності, мінливого середовища та обмежених часових ресурсів. Водночас доцільно враховувати, що динаміка розвитку надзвичайної екологічної ситуації часто характеризується не тільки кількісними, але і якісними показниками. Тому ОПР доводиться маніпулювати якісною інформацією

у вигляді гіпотез (припущень), інтуїтивних понять тощо. Застосування якісних показників потребує залучення відповідних інструментів, таких як експертні методи, методи теорії нечітких множин та інші, які характеризуються певним рівнем суб'єктивізму [3-6].

Ураховуючи вищезазначене, можна визначити такі особливості управління екологічною безпекою планової діяльності:

- невизначеність (неповнота, неточність, суперечливість і помилковість) вихідних даних і знань;
- нестационарність, суттєва нелінійність і значна розмірність моделей надзвичайних екологічних ситуацій;
- динамічна зміна вхідних даних для прийняття рішень під час виконання завдання;
- територіальна прив'язка;
- неможливість спостереження багаторазового повторення подій в однакових умовах;
- істотний вплив суб'єктивності (людського фактору) на прийняття рішень;
- значна розмірність простору можливих рішень;
- ліміт часу на прийняття рішень.

Перераховані особливості проблемної області, що відображають складність прийняття рішень в умовах управління екологічною безпекою, вимагають розроблення і впровадження нових моделей, методів та геоінформаційної технології, що дозволить обробляти не тільки кількісні, але і якісні параметри.

Завдання управління екологічною безпекою планової діяльності має такі особливості:

- основним джерелом знань є досвід, а не моделі;
- результати вирішення завдання підтримки прийняття рішень не є унікальними для кожної ситуації, тобто можуть використовуватися в інших (подібних) ситуаціях;
- мета вирішення завдання полягає не в отриманні гарантовано точного рішення (результату), а в отриманні найкращого із можливих рішень.

Перераховані властивості і чинники невизначеності або суб'єктивності дозволяють віднести природно-техногенні системи в умовах надзвичайних екологічних ситуацій до класу слабо структурованих систем, а проблему підтримки прийняття рішень – до класу складних і важко формалізованих проблем [3]. Отже, для вирішення завдання підтримки прийняття рішень у складних екологічних системах в умовах надзвичайних ситуацій потрібно застосовувати інтелектуальні методи (експертні оцінки).

2. Аналіз наявних підходів до побудови інтегрованих автоматизованих систем під час управління екологічною безпекою

Прикладом міждержавної інформаційної системи є Глобальна інформаційна мережа GDIN, створена урядом США у 1997 році, яка надає інформацію про стихійні лиха і здійснює підтримку прийняття рішень. Система поєднує низку міжнародних, державних, недержавних і комерційних організацій

у царині реагування на надзвичайні ситуації. У США розроблено комплекс програм HAZUS, який дозволяє оцінювати ризик від деяких НСПХ, таких як повені, землетруси, урагани тощо з метою побудови плану дій щодо ліквідації наслідків таких НС [9]. Обмеженням цього комплексу програм є те, що він не враховує ризик від декількох НС, які поширюються одночасно.

У Новій Зеландії розроблено систему програмного забезпечення RiskScape для аналізу ризиків від декількох надзвичайних ситуацій, таких як повені, землетруси, цунамі, ураганні вітри. Методологія RiskScape дозволяє порівнювати різні джерела небезпеки за допомогою функції нестійкості, яка визначає відношення між НС, характеристиками ресурсів, що знаходяться в умовах ризику, і потенційним збитком.

За підтримки координаційного центру із попередження стихійних лих у Центральній Америці (CEPREDENAC) розроблено ГІС-орієнтовану систему CAPRA, засновану на аналізі статистичних даних, що дозволяє оцінювати імовірність ризику землетрусів, ураганів, вивержень вулканів, повеней, цунамі та пов'язаних із ними збитків [9].

У Німеччині функціонує розподілена система збору та пошуку інформації IMIS, яка здійснює постійний моніторинг навколишнього середовища з метою надання інформації і прогнозування радіаційної обстановки [9].

Нині діє низка проєктів, які фінансуються Європейським Союзом, спрямованих на розроблення методології оцінки ризиків від природних НС (посухи, землетруси, повені) і техногенних НС (аварії об'єктів ядерної енергетики та інших). Це такі проєкти, як NaRAs, MATRIX, CLUVA, ByMur, EPSON HAZARD. Зазначені проєкти базуються на різних підходах: від якісного (найпростішого у використанні) до кількісного, який забезпечує більш точну оцінку елементів ризику.

На якісній оцінці ризику базуються проєкти ESPON-HAZARD 1.3.1 і MATRIX [8; 9], особливістю яких є використання методу Дельфі, що передбачає складання анкет із питаннями для групи експертів, де їм пропонується висловити свої суб'єктивні оцінки ризику від певних НС. У проєкті ESPON анкети, запропоновані експертам, дозволяють ранжувати НС, що аналізуються, на основі набору вагових значень, які подають значущість кожної НС на узагальненій мапі. У проєкті MATRIX якісний метод дозволяє інтегрувати знання кінцевих користувачів для ідентифікації НС і вразливих об'єктів. Загалом метод Дельфі характеризується суб'єктивністю і вимагає багато часу та організаційних зусиль. Кількісні методи оцінки ризику, такі як зважені суми, байєсовські мережі, ймовірнісні підходи були використані у проєктах NaRAs, CLUVA, ByMur.

Прикладом автоматизованих систем підтримки прийняття рішень у НС є європейська комплексна система RODOS, яка є розробкою більш ніж

20 європейських інститутів і призначена для підтримки прийняття рішень у реальному масштабі часу в умовах НС, пов'язаних із радіаційною ситуацією в Європі. Система містить підсистеми аналізу та оцінки ситуації, а також вибору ефективних контрзаходів. Система RODOS у межах проекту TACIS TA REG 02/3 була впроваджена в Україні. Система РОДОС-Україна забезпечує раннє попередження і радіаційний моніторинг на основі показників мережі метеорологічних станцій України, оброблених УкрГідрометцентром [7; 8].

Традиційне отримання інформації для ППР в умовах НСПХ здійснюється за допомогою експертів прямо на місцевості або шляхом аналізу показників, які надходять від супутників, протипожежних вишок тощо. Проте останні досягнення у галузі аерокосмічних технологій призвели до створення нових можливостей для застосування космічних і безпілотних літальних апаратів у системі управління екологічною безпекою планової діяльності.

Моніторинг ПРХ зазвичай здійснюється експертами, які оцінюють візуально або за допомогою камер швидкість поширення, інтенсивність та інші характеристики. Окрім того, використовуються ДПЛА, що дозволяють спостерігати за розповсюдженням ПРХ, але вони коштують дорого, а їхнє використання пов'язане з ризиком для людини, яка здійснює керування.

Моніторинг за допомогою мобільних екологічних систем спостереження дозволяє автоматично отримувати актуальну своєчасну інформацію, що забезпечує володіння ситуацією та інформованість ОПР під час прийняття рішень в умовах надзвичайних екологічних ситуацій, і дозволяє знизити ризик для людей, залучених до моніторингу. Космічні та безпілотні літальні апарати (БПЛА) дозволяють спостерігати за територією, передавати зображення і відеоінформацію. Аерофотознімки, особливо накладення зображень у декількох проєкціях, і матеріали відеозйомки ПРХ дозволяють діагностувати ситуацію під час надзвичайної екологічної ситуації і визначати об'єкти, що знаходяться в умовах максимального ризику. ДПЛА можуть відігравати важливу роль також і в ліквідації надзвичайної екологічної ситуації.

Отже, інтеграція аерокосмічних систем екологічного спостереження і методів оброблення екологічної інформації забезпечує швидке та порівняно дешеве вирішення багатьох завдань екологічного управління.

ДПЛА можуть виконувати тривалі та багаторазово повторювані місії, однак невизначеність і спотворення зображень через вібрації і турбулентність, а також неможливість точного вимірювання параметрів, потрібних для прийняття рішень, є істотними недоліками цього підходу. Істотним є також той факт, що використання ДПЛА для моніторингу дає змогу діагностувати екологічну ситуацію тільки під час спостереження, але не надає можливості прогнозу-

вання ПРХ для оцінки майбутньої екологічної ситуації. Тому перспективним напрямком є комбінація моніторингу і моделі поширення ПРХ, яка дозволяє прогнозувати динаміку ПРХ для оцінки майбутнього ризику. Це, у свою чергу, надає також можливість уточнення моделі, якщо результати моніторингу розбігаються із її вихідними показниками.

Огляд наявних досліджень практичного і прикладного характеру, спрямованих на управління екологічною безпекою в умовах надзвичайних ситуацій, показує, що більшість нинішніх підходів орієнтована на вирішення задач у межах певної території та обмежена розглядом певних видів надзвичайних ситуацій. Винятком є проєкт MATRIX, присвячений розробці узагальненої методології оцінки ризику, що застосовується для різних надзвичайних ситуацій [9].

Аналіз методологій оцінки ризику, покладених в основу розглянутих проєктів, показав, що більшість із них прив'язана до певної території та використовує для оцінки ризику імовірнісний підхід, заснований на накопиченні статистичних показників про події, що відбувалися в минулому, а також пов'язана зі значною обчислювальною складністю, внаслідок чого ці методології не можуть застосовуватись у системах реального часу. Не досить уваги приділено оцінці динаміки компонентів ризику в умовах надзвичайних екологічних ситуацій, необхідної у системах реального часу, яку доцільно здійснювати із використанням комбінації моніторингу надзвичайної екологічної ситуації та моделі розповсюдження ПРХ.

3. Технологія використання аерокосмічних технологій для управління екологічною безпекою планової діяльності підтримки прийняття рішень в умовах надзвичайних ситуацій природного характеру.

Під час моделювання надзвичайних екологічних ситуацій у разі управління екологічною безпекою слід урахувати, що надзвичайні ситуації відрізняються за природою виникнення, інтенсивністю, масштабом поширення, швидкістю розповсюдження, а також за своїм впливом на вразливі об'єкти. Процеси руйнівного характеру і надзвичайні ситуації, які виникають унаслідок цих процесів, можуть мати різні джерела виникнення: природні (геологічні, гідрометеорологічні, біологічні) або антропогенні (деградація природного середовища, технологічні). Кожний ПРХ характеризується місцем виникнення і площею поширення, інтенсивністю, частотою, тривалістю, швидкістю поширення.

Пропонується така класифікація надзвичайних екологічних ситуацій за природою виникнення:

1) надзвичайні ситуації – природні процеси, які можуть створювати руйнівний ефект (деградація ґрунтів, природні пожежі, інфекційна захворюваність людей і сільськогосподарських тварин, землетруси, урагани тощо);

2) надзвичайні ситуації техногенного характеру – ситуації, походження яких пов'язане із технічними об'єктами (вибухи, пожежі, аварії на хімічно небезпечних об'єктах, викиди на радіаційно небезпечних об'єктах, аварії із викидом екологічно небезпечних речовин, обвалення будівель і споруд, аварії на системах життєзабезпечення, транспортні катастрофи тощо);

3) антропогенні надзвичайні ситуації – порушення природних процесів, що виникають унаслідок помилкової або навмисної діяльності людини та мають руйнівний ефект (забруднення атмосфери, збройні конфлікти).

За джерелом виникнення надзвичайні екологічні ситуації поділяють на метеорологічні, геоморфологічні та геологічні (унаслідок аномалій на поверхні Землі), екологічні (відносяться до флори і фауни), технологічні, глобальні (відносяться до навколишнього середовища у глобальному масштабі) та позаземні (таблиця 1).

За масштабом поширення надзвичайні екологічні ситуації можуть охоплювати локальні ділянки місцевості (такі як паводки, зсуви) або цілі регіони і навіть континенти, такі як посухи або процеси, пов'язані зі зміною клімату.

Комп'ютерні моделі надзвичайних екологічних ситуацій є обов'язковою компонентою систем підтримки прийняття управлінських екологічних рішень в умовах управління екологічною безпекою.

Існує підхід до вирішення цієї задачі із застосуванням методів статистичного аналізу для ретроспективних баз даних. Для побудови таких моделей потрібен великий обсяг статистичних показників, які описують спостережувані в минулому реальні надзвичайні екологічні ситуації. Однак нерепрезентативність і неточність статистичних параметрів, пов'язаних із виникненням і розповсюдженням процесів руйнівного характеру, а також недостатня точність вимірювання екологічних параметрів зовнішнього середовища перешкоджають отриманню достовірних прогнозів, що знижує цінність самостійного застосування статистичних підходів. Показники, які описують площі та периметри райо-

нів надзвичайних екологічних ситуацій, мають дуже грубе наближення, а великі часові інтервали між спостереженнями можуть спотворювати важливі деталі того, як надзвичайна ситуація змінюється протягом певного періоду. Особливо це стосується надзвичайних ситуацій, які швидко поширюються.

Нині є певні успіхи у побудові теоретичних моделей надзвичайних екологічних ситуацій, але водночас залишається низка проблем: неповноцінне аналітичне вивчення відповідних крайових задач та обмежена кількість еталонних рішень, отриманих для гранично спрощених умов; відсутність загального обґрунтування прийнятих у моделях математичних описів; необхідність розроблення нових чисельних методів вирішення крайових задач, що виникають, і підвищення швидкодії алгоритмів розрахунку за теоретичними моделями.

Технологія управління екологічною безпекою планової діяльності і підтримки прийняття рішень в умовах надзвичайних ситуацій природного характеру повинна ґрунтуватися на визначенні екологічних загроз та ризиків. Водночас ризик прийнято визначати у вигляді комбінації імовірності виникнення і наслідків невизначених майбутніх подій [3-6].

Незважаючи на те, що термінологія, пов'язана з ризиком, пройшла довгий шлях еволюції і має свої традиції, вона донині є спірною. Зокрема, до теперішнього часу немає однозначного визначення терміну «ризик» і пов'язаних із ним понять, таких як «небезпека», «загроза». Більшість дослідників під час оцінки ризику основну увагу приділяють збиткам, описуючи ризик переважно як взаємозв'язок фізичної імовірності виникнення руйнівного процесу або явища і потенційного збитку, який вони наносять людям і навколишньому середовищу.

Іноді ризик представлено як комбінацію невідзначеності, пов'язану із виникненням надзвичайної ситуації, та збитків. Ризик також може визначатись як кількісна міра наслідків виникнення небезпеки, яка встановлюється за допомогою умовної імовірності виникнення збитків. Відомий підхід, коли ризик визначається як імовірність того, що певне несприятливе явище виникне протягом певного періоду часу [3]

Таблиця 1

Класифікація надзвичайних екологічних ситуацій за джерелом виникнення

Метеорологічні	Геоморфологічні та геологічні	Екологічні	Технологічні	Глобальні	Позаземні
Посуха Пилова буря Повінь Ураганний вітер Гроза Град Торнадо Циклон Аномальна спека Холодний атмосферний фронт	Землетрус Цунамі Виверження вулкану Зсув Сніговий обвал Просідання порід Берегова ерозія	Хвороба сільськогосподарських культур Хвороба тварин Зараження комахами Лісова пожежа Зникнення коралових рифів Пестициди	Збройний конфлікт Наземні міни Автомобільна катастрофа Хімічна аварія Витік нафти Забруднення води, ґрунту, повітря	Кислотний дощ Забруднення атмосфери Глобальне потепління Підвищення рівня моря Виснаження озонового шару	Падіння астероїду

Міжнародне товариство з аналізу ризику (Society for Risk Analysis) дає такі визначення терміну «ризик» [9]:

1) ризик – це потенціал здійснення небажаних і несприятливих наслідків для людського життя, здоров'я, майна або навколишнього середовища;

2) оцінка ризику заснована на очікуваному значенні умовної імовірності виникнення події, помноженої на наслідки події за умови, що ця подія сталася.

Виходячи із зазначених вище визначень, будь-який ризик пов'язаний із потенційними наслідками впливу небажаного явища. У всіх перерахованих вище роботах збитку приділяється головна увага, проте питання його теоретичного опису не отримало належної уваги. Такі поняття, як збиток і несприятливі наслідки явно чи неявно припускають певну цінність, яка приписується об'єктам, що знаходяться під впливом небезпечного явища.

Схему врахування екологічного ризику у системі управління екологічною безпекою планової діяльності представлено на рис. 2.

Треба відзначити певні обмеження робіт із оцінки ризику, заснованих на вразливості. Вразливістю є здатність об'єкта руйнуватися в умовах надзвичайної екологічної ситуації. Однак існує ще одна характеристика об'єкта, протилежна вразливості, яку можна

назвати функціональною стійкістю. Функціональна стійкість дозволяє екологічному об'єкту зберігати цінність в умовах надзвичайних екологічних ситуацій. Сукупний вплив вразливості і функціональної стійкості виражається у зміні цінності об'єкта у відповідь на вплив надзвичайної ситуації.

Для оцінки екологічних ризиків можуть застосовуватися такі підходи [3-8]: кількісна оцінка ризику; підхід на основі дерев подій; підхід на основі матриці ризиків; підхід на основі індикаторів.

Перші два методи є кількісними, останні два – якісними. Кількісний підхід до оцінки екологічного ризику заснований на статистичній обробці показників і вимагає знання ймовірностей виникнення надзвичайної екологічної ситуації та охоплення певної ділянки цим процесом. Унаслідок складності отримання значущої статистичної вибірки вона відбирається на великій ділянці місцевості (часто у масштабі країни) і за великий проміжок часу (10-100 років), компенсуючи непрезентативність.

Недостатню кількість статистичних показників зазвичай компенсують використанням методів імітаційного моделювання, пов'язаних із високою обчислювальною складністю.

Оцінка ризику, отримана за допомогою такого підходу, є статичною величиною. Сумарний ризик оцінюється за допомогою виразу [3]:

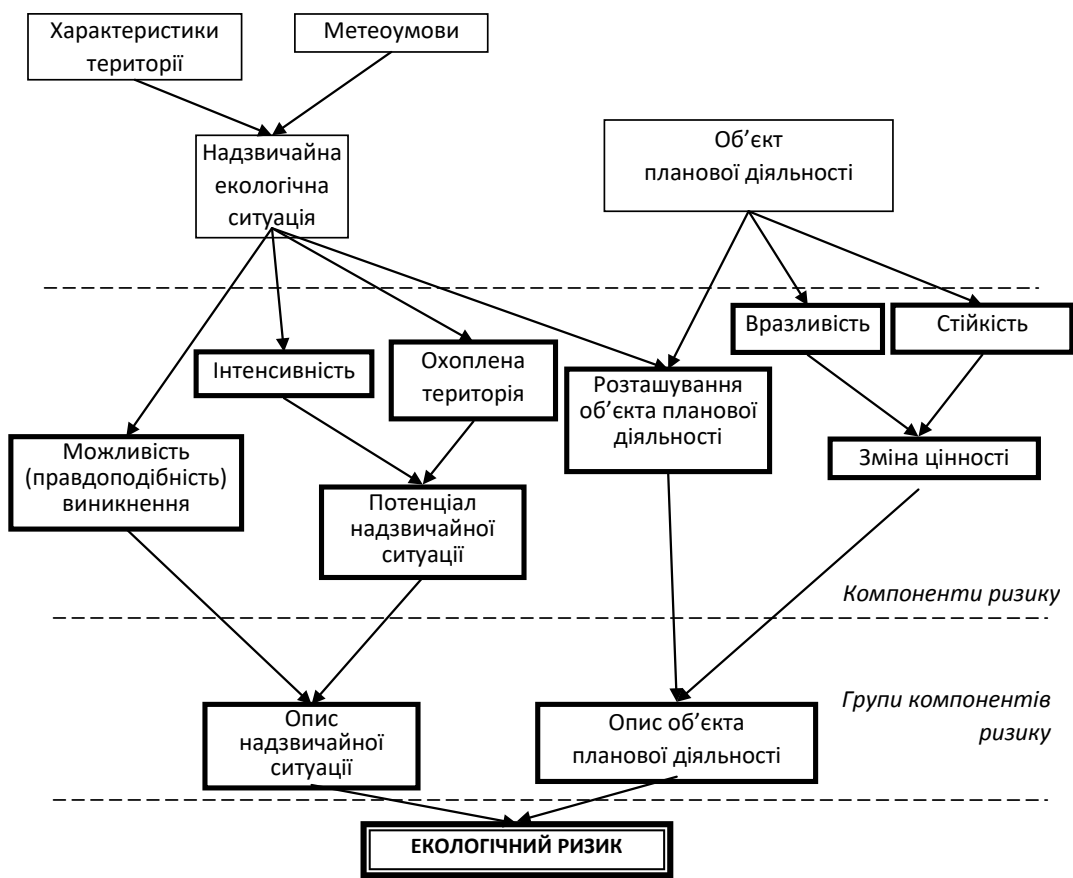


Рис. 2. Структура екологічного ризику

$$Risk = \sum_{\text{всі сценарії}} \left(\int_{P_T=0}^{P_T=1} P_{(T|HS)} * \left(\sum_{\text{всі ЦО}} \left(P_{(s|HS)} * \left(A_{(ЦО|HS)} * V_{(ЦО|HS)} \right) \right) \right) \right),$$

де $P_{(T|HS)}$ – часова ймовірність певного сценарію надзвичайної ситуації (HS), під яким розуміють надзвичайну екологічну ситуацію певного типу (наприклад, пожежа, повінь тощо) певної частоти;

$P_{(s|HS)}$ – просторова ймовірність того, що певна територія буде охоплена певним сценарієм надзвичайної екологічної ситуації;

$A_{(ЦО|HS)}$ – цінність об'єктів, схильних до негативного впливу певного сценарію надзвичайної ситуації;

$V_{(ЦО|HS)}$ – вразливість об'єктів, які знаходяться в зоні ризику, для певного сценарію надзвичайної ситуації (значення від 0 до 1).

Кількісний метод може успішно використовуватися для попередження надзвичайних екологічних ситуацій, але для підтримки прийняття рішень у системах реального часу, де рішення приймаються в умовах ліміту часу, такий метод не може бути застосований.

Одним із поширених методів оцінки ризику є дерева подій, які дозволяють моделювати послідовність останніх, формуючи структури будь-якого рівня складності. Аналіз із використанням дерев подій може використовуватися для оцінки мультиризик у умовах декількох надзвичайних ситуацій, які слідує один за одним («ефект доміно»). Недоліком дерев подій є те, що події не прив'язані до місцевості. Водночас метод є доволі гнучким і має великий потенціал для розвитку. Прив'язка подій до місцевості дозволила б моделювати динаміку просторово розподілених надзвичайних екологічних ситуацій. Такі моделі можуть доповнюватися з урахуванням різних способів оцінки невизначеності (імовірнісних, нечітких, наближених тощо).

Підхід на основі матриці екологічного ризику дозволяє оцінювати ризик із використанням певних класів замість точних значень, тим самим дозволяючи подолати проблему кількісного підходу в умовах недостатньої репрезентативності вибірки. Матриці ризику будують на основі експертних знань, вони дозволяють класифікувати ділянки місцевості за ступенем ризику на основі інформації про частоту надзвичайних екологічних ситуацій та очікувані збитки. Слід зазначити, що оцінка такої частоти не завжди є однозначною, оскільки на тій самій ділянці можуть бути зіставлені різні комбінації частоти надзвичайних ситуацій та очікуваних збитків. Ефективність застосування методу залежить від компетентності експертів, які формують сценарії надзвичайної екологічної ситуації, а також ранжирують їх за частотою і можливим збитком. Цей метод також не дозволяє отримувати кількісні значення оцінки ризику.

Підхід на основі індикаторів використовується у випадках, коли кількісні методи не можуть застосовуватися за відсутності вхідних показників. Такий

підхід дозволяє здійснювати всебічну оцінку ризику, враховуючи додаткові компоненти, такі як соціальний, економічний чинники, а також уразливість об'єктів, що знаходяться в зоні ризику. Із множини компонентів формується дерево, кожному вузлу якого присвоюється вага. Недоліком підходу є те, що підсумкова оцінка ризику є відносною і не відображає інформацію про очікувані збитки [6].

Наведений огляд методів оцінки ризику у СППР дозволяє зробити висновок про те, що наявні підходи дозволяють отримувати статичну оцінку ризику лише на етапі, який є попереднім для надзвичайних екологічних ситуацій, і практично не придані до застосування у системах реального часу. Більшість методів, що використовуються нині для оцінки ризику, є кількісними, заснованими на статистичному аналізі показників. Унаслідок того, що достатню кількість статистичних параметрів, які описують реальні надзвичайні екологічні ситуації, складно зібрати, вибірка береться на великій ділянці місцевості та за великий проміжок часу. Нерепрезентативність вибірки компенсується методами імітаційного моделювання, пов'язаними із проведенням численних обчислювальних експериментів. Зокрема, для обчислення ймовірності виникнення надзвичайної екологічної ситуації часто використовується метод Монте-Карло. Методи кількісної оцінки ризику мають істотний недолік – велику обчислювальну складність.

Оцінка ризику вимагає великої кількості кроків обробки географічної інформації, на кожному з яких потрібно обчислити характеристики ПРХ і вразливість складних екологічних об'єктів. Великий обсяг обчислень створює потенціал для помилок, а час, який витрачається на обчислення, ускладнює використання таких оцінок у СППР реального часу. Внаслідок цього оцінка ризику є статичною величиною, яка розраховується заздалегідь, до початку надзвичайної екологічної ситуації, і може бути використана для попередження надзвичайної ситуації. Але для підтримки прийняття рішень у системах реального часу, де про ймовірності не йдеться, а рішення приймаються в умовах ліміту часу, такий метод застосувати неможливо.

Тому перспективним науковим напрямом є розроблення ефективних ризик-орієнтованих геоінформаційних систем підтримки прийняття управлінських екологічних рішень в умовах процесів руйнівного характеру, діючих в реальному часі. Перспективні системи управління екологічною безпекою планової діяльності будуть здатними:

- приймати рішення за мінімальний проміжок часу, обмеженого внаслідок високої динаміки ситуації, а також значного обсягу різнобічної вхідної інформації, частина якої є невизначеною, висуває завдання, вирішення яких перевищує фізіологічні можливості ОПР;



Рис. 3. Актуальність управління екологічною безпекою планової діяльності за допомогою інтегрованих автоматизованих систем

- забезпечувати достатню деталізацію розподіленої у просторі оцінки ризику, що потрібно для прийняття обґрунтованих рішень у СППР реального часу;
 - забезпечувати динамічну реакцію ОПР в умовах швидкоплинних надзвичайних екологічних ситуацій.

Отже, актуальність управління екологічною безпекою планової діяльності за допомогою інтегрованих автоматизованих систем визначається необхідністю усунення протиріч між недоліками наявних методів оцінки екологічного ризику та вимогами до систем підтримки прийняття управлінських екологічних рішень у реальному часі (рис. 3).

Висновки. Здійснено аналіз наявних систем підтримки прийняття рішень в інтегрованих автоматизованих системах управління екологічною безпекою. Визначено, що формування інтегрованих автоматизованих систем управління екологічною безпекою доцільно здійснювати на основі ризик-орієнтованої підтримки прийняття екологічних рішень. Запропоновано класифікацію процесів руйнівного характеру в екосистемах для застосування в інтегрованих автоматизованих системах управління екологічною безпекою планової діяльності. Обґрунтовано, що інтегровані автоматизовані системи управління екологічною безпекою доцільно будувати із використанням моделей і методів ризик-орієнтованої підтримки прийняття рішень в умовах виявлення екологічних загроз і ризиків. Інтегровані автоматизовані системи є відкритими складними динамічними сис-

темами, які містять сукупність природних і штучних картографічних об'єктів і серед яких виділяються певні екологічні об'єкти, що представляють цінність для людини.

Для прийняття рішень у природно-техногенних системах в умовах виявлення екологічних загроз та ризиків доцільно аналізувати значні обсяги неповної і неточної інформації, яка швидко змінюється в часі, за істотних обмежень часу на оцінку обстановки і прийняття рішення, що дозволяє віднести природно-техногенні системи до класу слабо структурованих складних динамічних систем, а проблему підтримки прийняття рішень – до класу складних і важко формалізованих проблем. Необхідність прийняття рішень під час планової діяльності за короткий проміжок часу, зумовлена високою динамікою розвитку ситуацій і значним обсягом різнобічної вхідної інформації, частина якої є невизначеною, визначає завдання, для вирішення яких потрібні значні фізіологічні можливості особи, що приймає рішення. Застосування наявних методик оцінки екологічних загроз та ризиків, заснованих на статистичних методах із використанням імітаційних моделей, пов'язано із неприйнятною обчислювальною складністю, що є неприпустимою у системах підтримки прийняття рішень реального часу.

Визначено, що для підвищення своєчасності, обґрунтованості та ефективності рішень в інтегрованих автоматизованих системах під час здійснення

підтримки прийняття рішень у реальному часі варто використовувати динамічні моделі екологічних загроз та ризиків на основі просторово розподіленої моделі територіальної системи та моделі процесів

руйнівного характеру, що розвивається у її межах, які враховують вплив навколишнього середовища та рішення особи, уповноваженої приймати їх, а також забезпечують достатню деталізацію у просторі і часі.

Література

1. Закон України «Про оцінку впливу на довкілля». Відомості Верховної Ради (ВВР). 2017. № 29, ст.315. Із змінами, внесеними згідно із Законами № 199-IX від 17.10.2019, ВВР, 2019, № 51, ст. 377, № 733-IX від 18.06.2020 р.
2. Закон України «Про стратегічну екологічну оцінку», який вступив у дію 20 жовтня 2018 року за № 2354-VIII.
3. Машков О. А., Іващенко Т.Г., Денисенко І. Ю. Застосування системного підходу до проведення оцінки та вивчення еколого-техногенного стану зони відчуження та розроблення рекомендацій щодо природно-ресурсного відновлення на екологічних засадах. Монографія. Київ : Основа, 2021. 80 с.
4. Іващенко Т.Г. Стратегічна екологічна оцінка документів державного планування: Монографія. Під загальною науковою редакцією д.б.н. Г. Г. Шматкова. Київ : Основа. 2021. 60 с.
5. Бондар О.І., Машков О.А., Міхєєв В.С. Системний підхід щодо створення системи підтримки екологічних рішень для забезпечення екологічної безпеки держави. *Екологічні науки: науково-практичний журнал*. 2020. № 3(30). С. 30-38.
6. Машков О.А., Іващенко Т.Г. Проблеми управління екологічною безпекою планованої діяльності за допомогою систем підтримки прийняття управлінських інформаційних екологічних рішень. *Науковий часопис Академії національної безпеки*. 2020. №3-4 (27-28). С. 7-34.
7. Машков О.А., Іващенко Т.Г., Мухіна К.Є. Застосування аерокосмічних технологій при управлінні екологічною безпекою планованої діяльності за допомогою інтегрованих автоматизованих систем. *Науковий часопис Академії національної безпеки*. 2021. №1-2 (29-30). С. 4-27.
8. Mashkov O., Zhukauskas S., Nigorodova S., Kosenko V. Innovative approaches of using the methods for remote sensing of the earth for monitoring the ecological-technical condition of water ecosystems. *Екологічні науки: науково-практичний журнал*. 2019. № 3(26). С.115-125.
9. Экологический аудит. Не только для имиджа. *INVESTGAZETA.DELO.UA* URL: <http://www.investgazeta.net/praktika/ekologicheskij-audit.-ne-tolko-imidzha-161171>.