

УДК 351.861

Vadym Tiutiunyk¹, Doctor of Technical Sciences, Senior Research
ORCID ID 0000-0001-5394-6367

Oleksandr Sobol¹, Doctor of Technical Sciences, Senior Research
ORCID ID 0000-0002-7133-6519

Vladimir Kalugin¹, Doctor of Chemical Sciences, Professor
ORCID ID 0000-0002-6899-1010

Julia Zakharchenko²
ORCID ID 0000-0003-1978-2818

¹National University of Civil Defense of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

²Research Institution "Ukrainian Scientific Research Institute of Ecological Problems",
Kharkiv, Ukraine

FORMATION OF THE DYNAMIC MODEL FOR OPERATIVE MONITORING OF THE ECOSYSTEM'S POLLUTION LEVEL THROUGH EMERGENCIES AT NUCLEAR POWER PLANTS

Abstract. *In conditions of uneven distribution of sources of danger across the territory of the state, each territory has its own levels of natural, technogenic, social and military loads, which influence on the composition of forces, tactical and technical characteristics of the means of the functioning geoinformation security system, namely the national security system.*

In Ukraine the civil defense system is functioning to ensure the implementation of state policy in the field of civil defense for protection of the population, territories, environment and property from emergencies by preventing such situations, eliminating their consequences and providing assistance to victims in peacetime and during a special period. The system consists of functional and territorial subsystems and is aimed to solving the issues of ensuring the necessary level of security of the state in the conditions of emergency. At the same time, the issues of implementation of the monitoring function and development of effective decisions by all local subsystems, which aimed at prevention and localization of different emergencies, remain completely open to the state.

In order to further develop the scientific and technical bases for the implementation of the subsystem of the civil defense system of Ukraine on operative monitoring of changes the boundaries of radiation pollution zone, the level of danger in the zone and the prediction of new hazards, a dynamic model of the combined use of unmanned aerial vehicles and ground control of radiation hazard factors, where the delivery of ground control devices to the danger zone is performed by unmanned aerial vehicles, is developed.

Keywords: *monitoring of radiation pollution zone; dynamic model for operative monitoring; unmanned aerial vehicles; delivery of automated control devices to the danger zone*

В.В. Тютюник¹, О.М. Соболев¹, В.Д. Калугін¹, Ю.В. Захарченко²

¹Національний університет цивільного захисту України, м. Харків, Україна

²Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем», м. Харків, Україна

ФОРМУВАННЯ ДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ ОПЕРАТИВНОГО МОНІТОРИНГУ РІВНЯ ЗАБРУДНЕННЯ ЕКОСИСТЕМИ ВНАСЛІДОК АВАРІЙ НА ОБ'ЄКТАХ ЯДЕРНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

***Анотація.** В умовах нерівномірного розподілу джерел небезпек по території держави кожній точці простору притаманні свої рівні природного, техногенного, соціального та воєнного навантажень, які впливають на склад сил та тактико-технічні характеристики засобів функціонуючої геоінформаційної системи безпеки, а саме системи національної безпеки.*

В Україні для забезпечення реалізації державної політики у сфері цивільного захисту щодо захисту населення, територій, навколишнього природного середовища та майна від надзвичайних ситуацій (НС) шляхом запобігання таким ситуаціям, ліквідації їх наслідків і надання допомоги постраждалим у мирний час та в особливий період функціонує Єдина державна система цивільного захисту (ЄДСЦЗ). Система ЄДСЦЗ складається з функціональних і територіальних підсистем та спрямована на розв'язання питань забезпечення необхідного рівня безпеки життєдіяльності території держави в умовах, коли виникла НС. При цьому, цілковито відкритими для держави залишаються проблемні питання реалізації в системі ЄДСЦЗ функції моніторингу та розробки ефективних управлінських рішень всіх локальних підсистем, спрямованих на попередження та локалізацію НС, в умовах зародження джерел небезпек різної природи.

З метою подальшого розвитку науково-технічних основ реалізації підсистеми ЄДСЦЗ України щодо оперативного моніторингу за змінами меж зони радіаційного забруднення, рівня небезпеки в зоні та прогнозування виникнення нових небезпек, в роботі сформована динамічна модель об'єднаного застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та наземних пристроїв контролю факторів радіаційної небезпеки, де доставка наземних пристроїв контролю у зону небезпеки виконується за допомогою БПЛА.

***Ключові слова:** моніторинг зони радіаційного забруднення; динамічна модель оперативного моніторингу; безпілотні літальні апарати; доставка автоматизованих пристроїв контролю у зону небезпеки*

Вступ

Постановка завдання. Актуальність та практична значущість наукових досліджень щодо розробки системи моніторингу радіоактивного забруднення екосистеми внаслідок аварій на об'єктах ядерної енергетики обумовлюється тим, що із 2 720 суб'єктів діяльності у сфері використання ядерної енергії в Україні, які отримали відповідні ліцензії на право роботи, 165 належать до високого ступеня ризику, 172 – до середнього, 2 383 – до низького. До I та II категорій радіаційної небезпеки належать енергетичні та дослідницькі ядерні установки, наслідком радіаційних аварій на яких можуть бути негативні ефекти у осіб з числа персоналу і населення, а також небезпечне забруднення екосистеми прилеглої локальної території.

На чотирьох атомних електростанціях України в експлуатації знаходяться 15 енергоблоків з водо-водяними енергетичними реакторами (ВВЕР), експлуатуючою організацією яких є ДП НАЕК «Енергоатом». На ВП «Запорізька АЕС» знаходиться в експлуатації сховище відпрацьованого ядерного палива «сухого типу». Це потребує планування, на основі результатів моніторингових досліджень, ефективних попереджувальних та невідкладних захисних дій за межами майданчиків таких установок відповідно до вимог документу серії норм безпеки МАГАТЕ GSR Part 7 «Готовність і реагування у випадку ядерної чи радіологічної аварійної ситуації», Відень, 2016 рік [1–11].

Одним із ключових засобів забезпечення безпеки функціонування об'єктів ядерної енергетики (ОЯЕ) є врахування досвіду експлуатації, що включає в себе проведення обліку та аналізу порушень у роботі об'єктів ядерної енергетики, впровадження корегувальних заходів для усунення виявлених причин і запобігання повторенню порушень, а також проведення моніторингу прилеглих до об'єктів ядерної енергетики зон радіоактивного забруднення екосистеми.

Слід відзначити, що при виникненні аварії на ОЯЕ необхідно: 1) здійснити оперативну побудову поля радіоактивного забруднення із заданою точністю, що можливо забезпечити за допомогою мобільних пристроїв контролю, прийняття обґрунтованих управлінських рішень стосовно необхідної кількості сил та засобів для ліквідації наслідків аварії; 2) виконати заходи евакуації населення із зони радіоактивного забруднення з урахуванням визначення шляхів евакуації з мінімальною їх довжиною в зоні забруднення; 3) виконати заходи, спрямовані на мінімізацію наслідків радіаційного забруднення екосистеми.

Для досягнення необхідної точності під час побудови поля радіоактивного забруднення необхідно застосовувати регулярну сітку з відомими значеннями рівня гамма-випромінювання у вузлах, що дозволить використати відомі методи інтерполяції. При цьому слід урахувати, що на теперішній час у 30-кілометровій зоні кожного ОЯЕ функціонують пости радіаційного моніторингу, які мають нерегулярне розміщення, тому унеможливується забезпечення необхідної точності при побудові поля забруднення.

Таким чином, розробка моделей та методів проведення аварійного моніторингу радіоактивного забруднення внаслідок аварії на ОЯЕ є актуальною науково-прикладною проблемою. Одним із шляхів вирішення даної проблеми є застосування БПЛА для здійснення оперативної побудови поля радіоактивного забруднення із заданою точністю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В роботі [12] наведено спосіб реконструкції поля радіоактивного забруднення внаслідок аварії на атомних електростанціях (АЕС) за даними від стаціонарних постів моніторингу. Тобто була запропонована регулярна сіткова модель для інтерполяції і прогнозування поля за даними нерегулярного просторового моніторингу, що призводило до збільшення похибки побудови зазначеного поля. Питанням реконструкції полів радіоактивного забруднення територій після ядерних вибухів присвячена робота [13].

В роботі [14] підкреслено актуальність використання БПЛА для проведення радіаційного моніторингу. Концепцію проектування системи після аварійного моніторингу АЕС з використанням БПЛА наведено в роботі [15]. Можливості та результати експерименту по застосуванню безпілотних авіаційних

комплексів для моніторингу навколишнього середовища АЕС представлені в роботі [16, 17].

Крім того, у рамках проведеного, з глибиною пошуку до десяти років, аналізу винахідницько-дослідницької діяльності [18–21], відомі технічні рішення визначення границь зон небезпек, які для розташування засобів контролю факторів небезпеки використовують космічні засоби встановлення місцезнаходження та розділяються за використанням повітряних і наземних рухомих платформ.

При використанні повітряних рухомих платформ відомі корисні моделі: БПЛА малого розміру для моніторингу територій пожеж, терористичних актів і техногенних катастроф, а також – літака для повітряного моніторингу стану довкілля [18].

БПЛА малого розміру для моніторингу територій пожеж, терористичних актів і техногенних катастроф обладнаний засобами моніторингу, які включають навігаційне обладнання, радіопеленгатор, тепlopеленгатор і телекамеру, сполучені через бортовий комп'ютер з приймально-передавальною антеною GPS, «ГЛОНАС» або стільникового зв'язку для передачі результатів моніторингу на центральний пункт управління літальним апаратом.

Літак для повітряного моніторингу стану довкілля обладнаний, по меншій мірі, одним засобом для моніторингу довкілля, який встановлено під крилом літака.

Недоліками використання повітряних рухомих засобів моніторингу зони екологічного забруднення у рамках відомих технічних реалізацій, проаналізованих у роботі [18], є те, що під час виникнення масштабної небезпеки для охоплення необхідного обсягу точок вимірювання потребується використання декількох (в залежності від розмірів зони) літаків з організацією окремих каналів управління їх польотом і каналів передачі телеметричної інформації від засобів моніторингу. При реалізації режиму безперервного отримання у реальному масштабі часу інформації про стан зони враження цей спосіб моніторингу потребує збільшення у два-три рази кількості літаків і засобів контролю, якими вони обладнані, їх обслуговування, обладнання паливом і проведення ремонтних робіт. Крім того, виникає утруднення при управлінні БПЛА при їх знаходженні у зонах поганої видимості (які виникають під впливом дій небезпечних факторів), у нічний час, у разі погіршення погодних умов, а також при необхідності проведення контролю небезпечних факторів біля поверхні Землі.

При використанні наземних рухомих платформ відомі: спосіб визначення меж зон надзвичайних ситуацій (НС) [19] і спосіб оперативного визначення епіцентрів, зміни меж зон НС і одержання оперативної інформації щодо прогнозування виникнення нових ризиків [20].

Спосіб визначення меж зон НС [19] застосовує наземні рухомі засоби та геостационарні супутники. Точки вимірювання встановлюються за допомогою наземних рухомих і геостационарних супутників, точки вимірювання переміщуються за допомогою наземних рухомих засобів.

Спосіб оперативного визначення епіцентрів, зміни меж зон НС та одержання оперативної інформації щодо прогнозування виникнення нових ризиків [20] реалізований за рахунок застосування наземних рухомих пристроїв з контрольно-вимірювальними засобами та засобами

електрозов'язку, а також за рахунок застосування диспетчерського пункту та супутникових засобів з засобами електрозов'язку та електронно-обчислювальними засобами. Визначають зони НС та зміну факторів небезпеки за допомогою наземних рухомих пристроїв з контрольно-вимірювальними засобами, які надають інформацію про наслідки НС до диспетчерських пунктів за допомогою засобів електрозов'язку через супутники.

Недоліками використання наземних рухомих засобів моніторингу зони екологічного забруднення у рамках відомих підходів [19, 20] є те, що під час моніторингу неможливо охопити вимірюванням потрібний обсяг точок вимірювання у зоні небезпеки, оскільки не всі точки є доступними для вимірювання. Крім того, реалізація цих підходів не забезпечує оперативного одержання потрібних обсягу та точності інформації.

Найбільш близьким технічним рішенням до проблеми розробки науково-технічних основ системи моніторингу на локальній території, динаміки зміни меж зон екологічного забруднення, рівня небезпеки в зоні та прогнозування виникнення нових небезпек є спосіб оперативного визначення ризиків НС [21]. Цей спосіб передбачає за допомогою наземних рухомих засобів з контрольно-вимірювальними пристроями визначати зони НС та зміну факторів небезпеки. Роль наземних рухомих засобів можуть виконувати транспортні засоби, а також окремі (піші) патрульні. Для надання інформації до диспетчерських пунктів напряму та через супутникові засоби про наслідки НС застосовують засоби електрозов'язку. Для аналізу динаміки подій, що виникатимуть у процесі тривання НС, та підвищення оперативності збору інформації, повітряні рухомі засоби обладнують контрольно-вимірювальними й електронно-обчислювальними засобами з електронно-картографічними програмами, засобами радіонавігації й електрозов'язку.

Недоліками описаного вище способу оперативного визначення ризиків НС [21] є те, що можливості реалізації режиму безперервного у реальному масштабі часу оперативного одержання потрібного обсягу інформації про епіцентри та зміни меж зон небезпек обмежені можливостями використання (патрулювання) особового складу підрозділів. Крім того, термін моніторингу обмежується терміном знаходження літака у повітрі або літаків, коли ситуація потребує використання декількох літаків, які обладнані ідентичними контрольно-вимірювальними й електронно-обчислювальними засобами з електронно-картографічними програмами, засобами радіонавігації й електрозов'язку.

Мета дослідження. Завданням дослідження є розвиток науково-технічних основ реалізації підсистеми оперативного моніторингу за зміною меж зони радіаційного забруднення, рівня небезпеки в зоні та прогнозування виникнення нових небезпек, як складової ЄДСЦЗ. Метою цієї роботи є формулювання моделі об'єднаного застосування БПЛА та наземних пристроїв контролю факторів небезпеки, де доставка наземних пристроїв контролю у зону небезпеки виконується за допомогою БПЛА.

Система оперативного моніторингу радіоактивного забруднення екосистеми безпілотними літальними апаратами внаслідок аварій на об'єктах ядерної енергетики

Мета роботи досягається тим, що безперервний та тривалий у реальному масштабі часу оперативний моніторинг за зоною радіаційного забруднення здійснюється за рахунок: а) сумісного об'єднання у систему моніторингу БПЛА та наземних пристроїв контролю факторів радіаційної небезпеки; б) оперативної доставки наземних мобільних пристроїв контролю у зону радіаційного забруднення БПЛА; в) створення в зоні та в її околиці тимчасової (на період ліквідації небезпеки) контролюючої мережі з автоматизованих наземних мобільних пристроїв контролю; г) отримання й обробки інформації від наземних мобільних пристроїв контролю диспетчерським пунктом, який розташовано на наземній рухомій платформі (штабний автомобіль, пожежно-рятувальний автомобіль, автомобіль радіаційної, хімічної та біологічної розвідки, бронетранспортер, машина військової розвідки, тягач та ін.) [18, 22–25].

Розроблену нами функціональну схему цієї системи оперативного моніторингу за зміною меж зони радіоактивного забруднення екосистеми, рівнем небезпеки в ній та прогнозування виникнення нових ризиків представлено на рис. 1. Вона включає класичну підсистему моніторингу, ситуаційний центр та підсистему виконання рішення [26, 27].

Наземний мобільний автоматизований пристрій оцінки параметрів радіаційного забруднення, схему якого представлено на рис. 2, а, включає: блок управління; контрольно-вимірювальний блок, з відповідним датчиком оцінки параметрів радіаційного забруднення; блок відеоспостереження; блок встановлення місця знаходження мобільного пристрою контролю (GPS-навігації); блок корегування місця положення мобільного пристрою на поверхні Землі; блок ручного корегування роботою мобільного пристрою; блок зберігання інформації; блок індикації; блок живлення; блок радіозв'язку; антену.

Наземний рухомий центр радіаційного моніторингу, схему якого представлено на рис. 2, б, включає: комп'ютеризовану аналітичну систему прогнозу границь зони радіаційного забруднення, рівня небезпеки в ній та можливості виникнення нових НС; контрольно-вимірювальний блок; блок метеорологічного контролю; блок встановлення місця знаходження наземного рухомого центру моніторингу (GPS-навігації); блок керування рухом БПЛА; блок отримання, аналізу та систематизації інформації від пристроїв оцінки параметрів радіаційного забруднення; блок збереження інформації; блок старту БПЛА; блок радіозв'язку; антену.

Представлений на рис. 3 електромеханічний пристрій для скидання з БПЛА у зону радіаційного забруднення автоматизованих пристроїв оцінки параметрів радіаційного забруднення містить [22, 23]: 1 – корпус пристрою для скидання з БПЛА автоматизованих пристроїв оцінки параметрів радіаційного забруднення; 2 – блок управління процесом скидання. Всередині корпусу 1 знаходяться: 1.1 – елементи кріплення електромеханічного пристрою до корпусу БПЛА; 1.2 – металеві пластини з зазором між ними (на них монтуються електромеханічні елементи пристрою); 1.3 – прокладка ущільнювача; 1.4 – металевий стержень для утримання автоматизованого

пристрою оцінки параметрів радіаційного забруднення; 1.5 – корпус котушки індуктивності для її кріплення до металевих пластин 1.2; 1.6 – елементи кріплення котушки індуктивності до металевих пластин 1.2; 1.7 – котушка індуктивності; 1.8 – зворотна пружина.

Авторами сформульовано принцип, розроблено та представлено підхід до оцінки ефективності покриття території зони радіаційного забруднення автоматизованими пристроями оцінки параметрів радіаційного забруднення, за умов їх доставки в зону небезпеки завислими, над точкою скидання, БПЛА та використання способів одиночного та касетного (див. рис. 4) скидання вантажу. Отримані аналітичні вирази для розрахунку відносного середнього виграшу у часі для касетного способу, у порівнянні з одиночним способом доставки автоматизованих пристроїв оцінки параметрів зони радіаційного забруднення [24, 25].

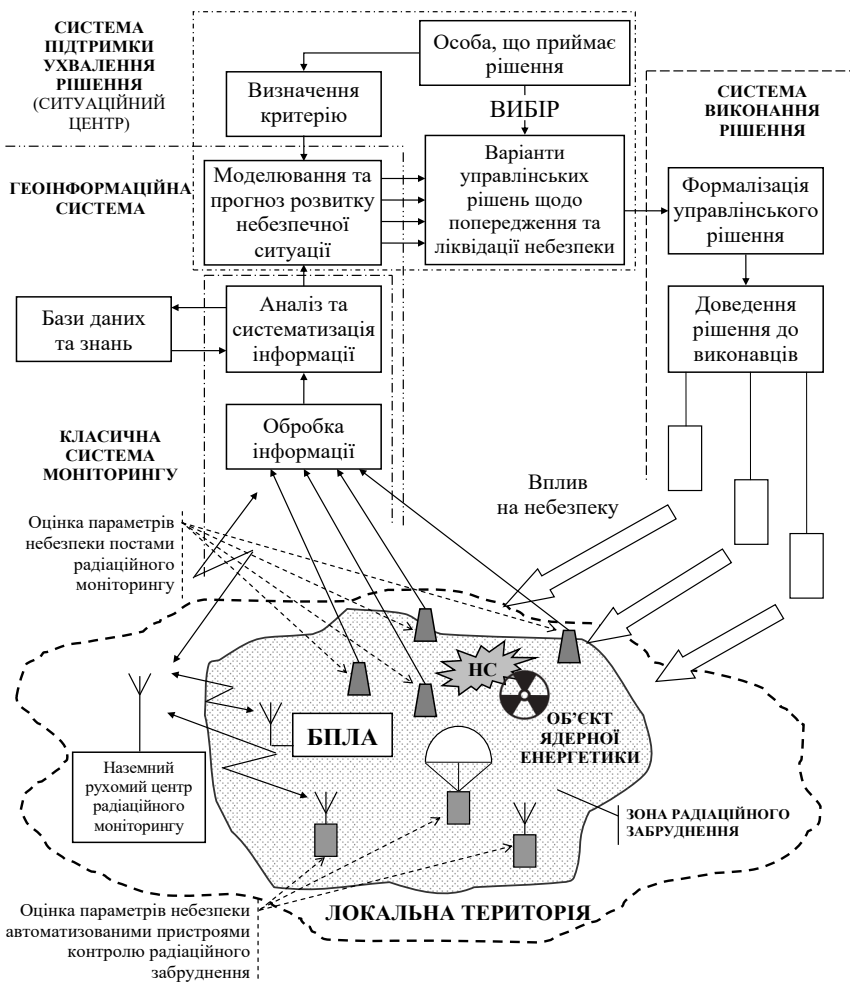


Рис. 1 – Комплексна функціональна схема системи оперативного моніторингу радіоактивного забруднення екосистеми безпілотними літальними апаратами внаслідок аварій на об'єктах ядерної енергетики

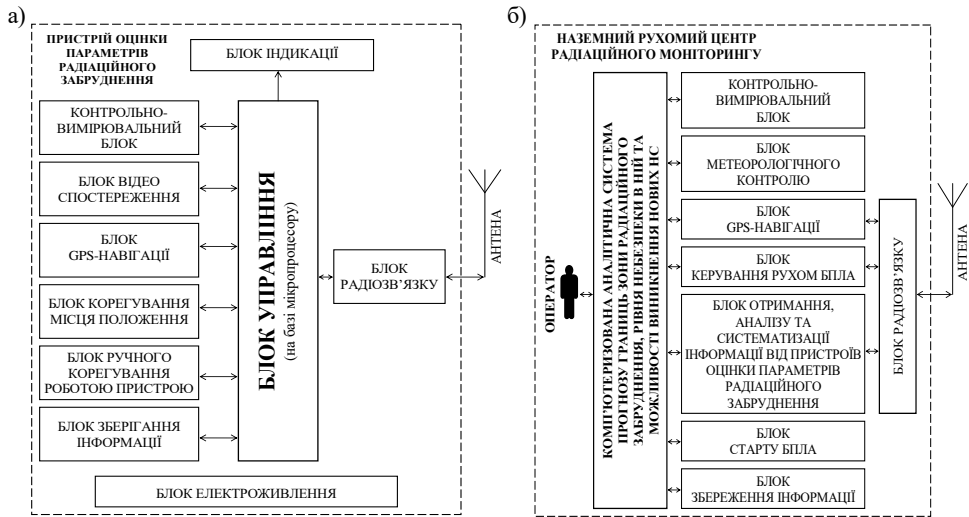


Рис. 2 – Функціональні схеми: а) наземного мобільного автоматизованого пристрою оцінки параметрів радіаційного забруднення; б) наземного рухомого центру радіаційного моніторингу

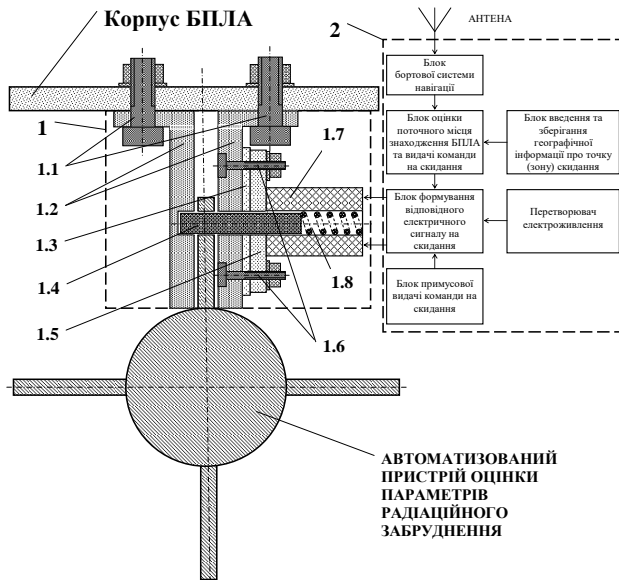


Рис. 3 – Електромеханічний пристрій для скидання з БПЛА у зону радіаційного забруднення автоматизованих пристроїв оцінки параметрів небезпеки

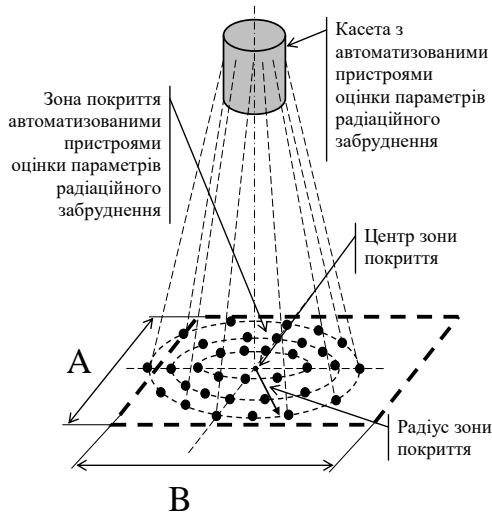


Рис. 4 – Схема покриття зони радіаційного забруднення касетним виробом, оснащеним автоматизованими пристроями оцінки параметрів небезпеки

Функціонування розробленої авторами підсистеми (яку представлено на рис. 1) оперативного моніторингу радіоактивного забруднення екосистеми, внаслідок аварій на об'єктах ядерної енергетики, повинно здійснюватись у складі функціонуючої в Україні чотирьохрівневої Єдиної державної системи цивільного захисту та в межах класичного контуру управління, який забезпечує: 1) збір, обробку та аналіз інформації; 2) моделювання розвитку обстановки на об'єкті управління та розвитку НС на території міста, регіону, держави; 3) розробку та ухвалення управлінських рішень щодо попередження та ліквідації НС, а також мінімізації їх наслідків; 4) виконання рішень щодо попередження та ліквідації НС, а також мінімізації їх наслідків [18, 22–30].

У розробленій підсистемі отримання інформації про параметри радіаційного забруднення здійснюється шляхом використання стаціонарних постів радіаційного моніторингу та автоматизованих пристроїв оцінки параметрів радіаційного забруднення, доставка яких у зону радіоактивного забруднення виконується БПЛА.

Отримана стаціонарними постами радіаційного моніторингу первинна інформація про рівень радіаційної небезпеки для екосистеми на локальній території по кабелях передається до пристроїв другого рівня.

Первинна інформація, що отримана автоматизованими пристроями оцінки параметрів радіаційного забруднення, які доставлено у зону радіоактивного забруднення за допомогою БПЛА, спочатку транслюється по радіоканалу до наземного рухомого центру радіаційного моніторингу, де відбувається первинний аналіз та систематизація цієї інформації. Від наземного рухомого центру радіаційного моніторингу інформація по радіоканалу транслюється також до пристроїв другого рівня.

Пристрої другого рівня призначені виконувати обробку отриманої інформації та представляти її у вигляді, необхідному для третього рівня. При цьому, обробка отриманої інформації може виконуватися як в одному місці, так і на декількох, залежно від конкретної системи моніторингу та розмірів контрольованої нею локальної території. Оброблена інформація у

відповідному вигляді надходить на третій рівень, де виконується її аналіз та систематизація даних, на основі чого робиться висновок про стан радіаційної небезпеки локальної території. Особливо важливо для забезпечення швидкодії системи використання автоматизованих засобів обробки інформації, яке значно прискорить процеси на другому та третьому рівнях системи моніторингу, дозволить створити електронні, доступні в реальному масштабі часу, бази даних та знань. Використання відповідних математичних методів дозволить на основі отриманої інформації у відносно нетривалі терміни часу виконати моделювання небезпечної ситуації, прогнозування її розвитку та рівня, відображати прогнозовану динаміку катастрофічних подій графічно (у тому числі з використанням електронних мап).

Друга інформаційна підсистема є системою підтримки ухвалення рішення. Особа, що приймає рішення (ОПР), визначає один або декілька критеріїв, відповідно до яких здійснюється прогностичне моделювання розвитку радіаційної небезпеки та виробляються варіанти управлінських рішень, які обґрунтовані відповідними розрахунками. З набору варіантів управлінських рішень ОПР обирає один, або задає ще додаткові критерії, відповідно до яких виконується моделювання та розробка управлінських рішень, направлених на недопущення розвитку небезпеки до рівня катастрофи. Якщо ж катастрофи вже не уникнути, то розробка управлінських рішень направлена на мінімізацію наслідків від неї. Затверджене ОПР рішення надходить до третьої підсистеми – підсистеми виконання рішення, де виконується його формалізація та доведення до виконавців – функціонуючої в Україні ЄДСЦЗ. Зміни стану локальної території та зміни стану небезпеки на ній викликать зміни у величинах вимірюваних параметрів, що фіксуються пристроями контролю. Подальше моделювання покаже ефективність виконання управлінського рішення – контур управління замкнувся.

Формування моделі об'єднаного застосування стаціонарних постів радіаційного моніторингу, безпілотних літальних апаратів та наземних пристроїв контролю факторів небезпеки

Формулювання, у відповідності до даних рис. 5, моделі об'єднаного застосування стаціонарних постів радіаційного моніторингу (у режимі повсякденного функціонування ОЯЕ), а також БПЛА та наземних тимчасових пристроїв контролю факторів небезпеки (у режимах аварійної та надзвичайної ситуацій ОЯЕ), де доставка цих наземних пристроїв контролю у зону радіаційної небезпеки виконується БПЛА, здійснено на основі наступних уявлень.

Нехай задано об'єкт ядерної енергетики – Рівненська АЕС, що представлена на рис. 6 у вигляді точки $A(0,0)$. Стаціонарні пости радіаційного моніторингу, які розташовані у тридцятикілометровій зоні навколо ОЯЕ та проводять оцінку радіаційної небезпеки для екосистеми у режимі повсякденного функціонування ОЯЕ, мають вигляд множини точок $P_m(x_m, y_m)$, $m = 1, \dots, N_S$, де N_S – кількість стаціонарних постів радіаційного моніторингу. Наземні тимчасові пристрої оцінки параметрів радіаційної небезпеки, які доставлено у зону радіаційного забруднення за допомогою БПЛА у режимах аварійної та надзвичайної ситуацій ОЯЕ, мають вигляд множини точок $F_g(x_g, y_g)$, $g = 1, \dots, N_T$, де N_T – кількість тимчасових пристроїв оцінки параметрів радіаційної небезпеки.

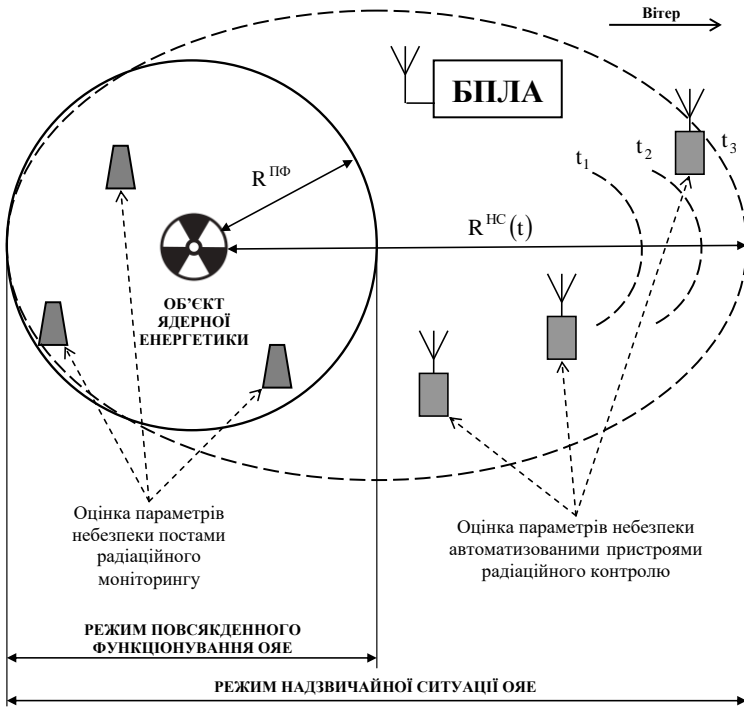


Рис. 5 – Схема об'єднаного застосування стаціонарних постів радіаційного моніторингу, БПЛА та наземних тимчасових пристроїв контролю факторів безпеки у різних режимах функціонування ОЯЕ

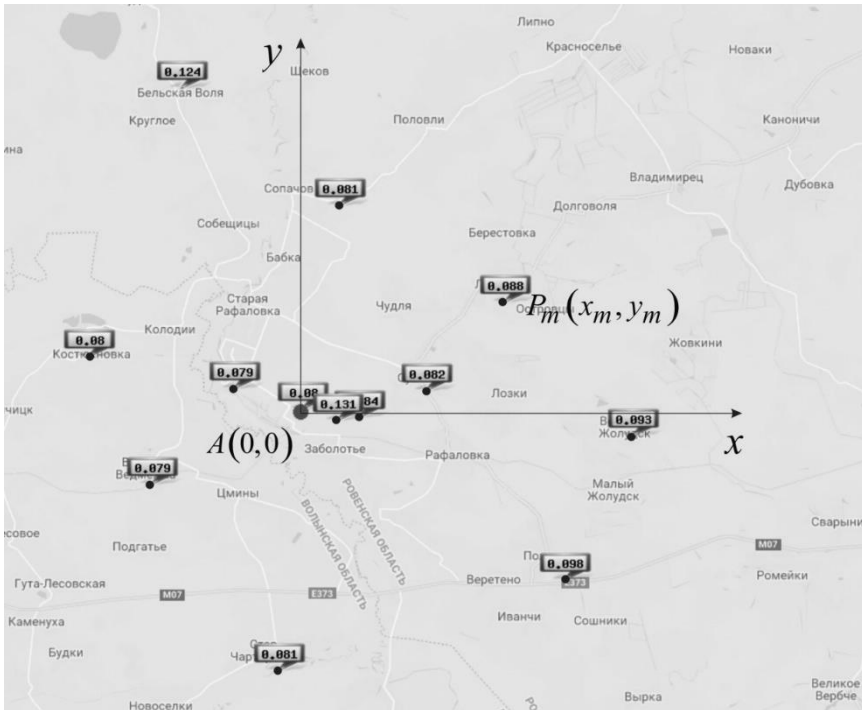


Рис. 6 – Схема розташування Рівненської АЕС та стаціонарних постів радіаційного моніторингу у тридцятикілометровій зоні навколо станції

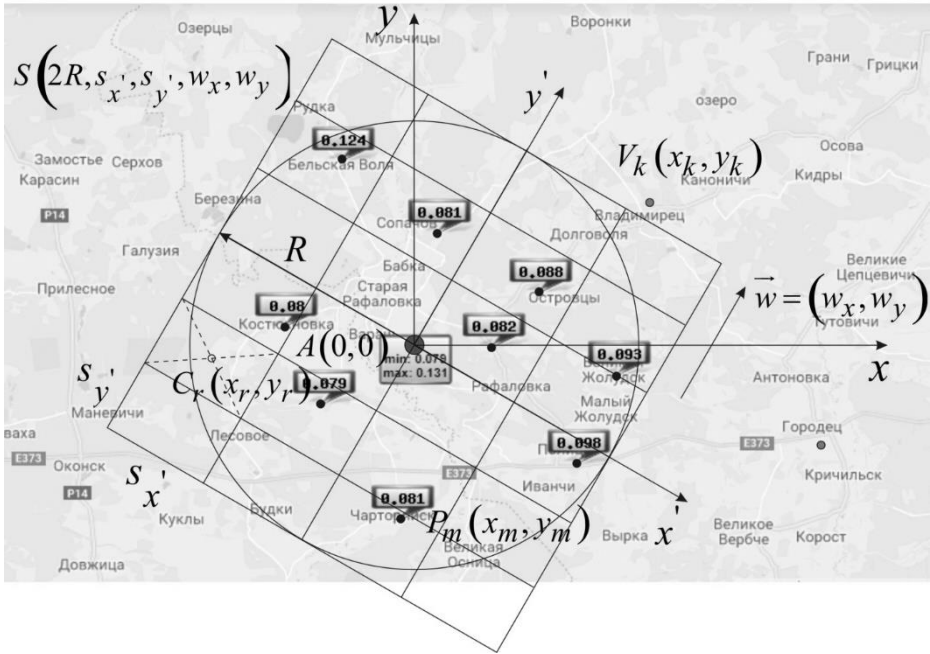


Рис. 7 – Побудова регулярної сітки для реконструкції поля радіоактивного забруднення

Необхідно визначити мінімальну кількість наземних тимчасових пристроїв оцінки параметрів радіаційної небезпеки ($N_{T_{\min}}$), доставка яких у зону радіоактивного забруднення виконується БПЛА, для ефективного проведення аварійного моніторингу радіоактивного забруднення внаслідок аварії на ОЯЕ. При цьому мають виконуватися наступні обмеження:

- побудова поля радіоактивного забруднення має здійснюватися із заданою точністю ε ;
- час на побудову поля забруднення, з урахуванням терміну розгортання системи моніторингу та доставки у зону радіоактивного забруднення безпілотними літальними апаратами тимчасових пристроїв оцінки параметрів радіаційної небезпеки, має не перевищувати гранично припустимого T^* ;
- регулярна сітка $S(2R, s_x', s_y', w_x, w_y)$ має будуватися з урахуванням вектора напрямку вітру $\vec{w} = (w_x, w_y)$, причому основою сітки є квадрат (рис. 7), в який вписане коло радіусу R із центром у точці $A(0,0)$. Радіус кола визначається за допомогою наступної умови: а) у режимі повсякденного функціонування (ПФ) об'єкта ядерної енергетики $R = R^{ПФ} = 30 \text{ км}$, а сітці мають належати стаціонарні пости радіаційного моніторингу $P_m(x_m, y_m)$, $m = 1, \dots, N_S$; б) у режимі аварійної та надзвичайної ситуацій об'єкта ядерної енергетики $R = R^{HC}(t)$ (зона НС змінюється у часі t), а сітці мають належати стаціонарні пости радіаційного моніторингу $P_m(x_m, y_m)$, $m = 1, \dots, N_S$ та наземні тимчасові пристрої оцінки параметрів радіаційної небезпеки, які доставлено у зону радіаційного забруднення за допомогою БПЛА, $F_g(x_g, y_g)$, $g = 1, \dots, N_T$;

– наземні тимчасові пристрої оцінки параметрів радіаційної небезпеки $N_{T_{ij}}$, $i = 1, \dots, N^{\text{БПЛА}}$ ($N^{\text{БПЛА}}$ – кількість БПЛА, з урахуванням корисного навантаження БПЛА – $N_T^{\text{БПЛА}}$), $j = 1, \dots, N_{T_i}$ (N_{T_i} – кількість наземних тимчасових пристроїв оцінки параметрів радіаційної небезпеки розташовано на борту i -го БПЛА), $N_T = \sum_{i=1}^{N^{\text{БПЛА}}} N_{T_i}$, мають розміщуватися на визначених місцях $V_k(x_k, y_k)$, $k = 1, \dots, N_K$, та фіксувати дозу гамма-випромінювання у вузлах сітки;

– мають також враховуватися технічні характеристики кожного виду БПЛА, а саме, швидкість, час польоту, максимальна дальність польоту, час розгортання тощо.

З врахуванням представлених обмежень модель моніторингу радіоактивного забруднення, з урахуванням об'єднаного застосування стаціонарних постів радіаційного моніторингу, БПЛА та наземних тимчасових пристроїв контролю факторів небезпеки у різних режимах функціонування ОЯЕ, має наступний вид:

$$\min_W N_{T_{\min}} (R^{HC}(t)), \quad (1)$$

де W :

$$\frac{|\Phi_{q+1}(C_r) - \Phi_q(C_r)|}{\Phi_q(C_r)} \leq \varepsilon; \quad r = 1, \dots, N_C; \quad (2)$$

$$\frac{|\Phi_{q+1}(P_m) - \Phi_q(P_m)|}{\Phi_q(P_m)} \leq \varepsilon; \quad m = 1, \dots, N_S; \quad (3)$$

$$\max T(l_i) \leq T^*; \quad i = 1, \dots, N^{\text{БПЛА}}; \quad L = \sum_{i=1}^{N^{\text{БПЛА}}} l_i; \quad (4)$$

$$\max N_{T_i} \leq N_T^{\text{БПЛА}}; \quad (5)$$

$$P_m(x_m, y_m) \in S(2R^{\text{ПФ}}, s_{x'}, s_{y'}, w_x, w_y); \quad m = 1, \dots, N_S; \quad (6)$$

$$F_g(x_g, y_g) \in S(2R^{\text{HC}}(t), s_{x'}, s_{y'}, w_x, w_y); \quad g = 1, \dots, N_T; \quad (7)$$

$$N_{T_{ij}} \in V_k(x_k, y_k); \quad i = 1, \dots, N^{\text{БПЛА}}; \quad j = 1, \dots, N_{T_i}; \quad N^T = \sum_{i=1}^{N^{\text{БПЛА}}} N_{T_i}; \quad k = 1, \dots, N_K. \quad (8)$$

Вираз (1) є цільовою функцією. Обмеження (2) та (3) являють собою умову побудови поля забруднення із заданою точністю ε . Тут $C_r(x_r, y_r)$ – точки, що знаходяться на перетину діагоналей кожної комірки сітки, причому кількість

комірок дорівнює N_C ; $\Phi_q(C_r)$ та $\Phi_{q+1}(C_r)$ – значення поля забруднення у відповідних точках на q та $q+1$ ітераціях; $P_m(x_m, y_m)$ – стаціонарні пости радіаційного моніторингу, кількість яких дорівнює N_S ; $\Phi(P_m)$ – рівень гамма-випромінювання, зафіксований стаціонарними постами радіаційного моніторингу. Обмеження (4) являє собою умову побудови поля забруднення протягом часу T , який залежить від маршрутів l_{ij} БПЛА щодо доставки у зону радіаційного забруднення наземних тимчасових пристроїв контролю факторів безпеки $N_{T_{ij}}$ і не перевищує заданого T^* . При цьому, L – сумарна довжина польоту БПЛА. Обмеження (5) характеризує умову завантаження i -того БПЛА наземними тимчасовими пристроями контролю факторів безпеки (N_{T_i}), з урахуванням не перевищення показника корисного навантаження БПЛА ($N_T^{\text{БПЛА}}$). Обмеження (6) являє собою умову належності стаціонарних постів радіаційного моніторингу регулярній сітці $S(2R^{\text{ПФ}}, s_x', s_y', w_x, w_y)$ у зоні (радіус зони дорівнює $R = R^{\text{ПФ}} = 30\text{км}$), яка характерна для режиму повсякденного функціонування об'єкта ядерної енергетики. Обмеження (7) являє собою умову належності наземних тимчасових пристроїв контролю факторів безпеки (які доставлено у зону радіаційного забруднення за допомогою БПЛА) регулярній сітці $S(2R^{\text{HC}}(t), s_x', s_y', w_x, w_y)$ у зоні (радіус зони змінюється у часі t та дорівнює $R = R^{\text{HC}}(t)$), яка характерна режиму аварійної та надзвичайної ситуацій об'єкта ядерної енергетики. Обмеження (8) описує належність наземних тимчасових пристроїв контролю факторів безпеки (які доставлено у зону радіаційного забруднення за допомогою БПЛА) фіксованим місцям їх розміщення $V_k(x_k, y_k)$, $k=1, \dots, N_K$.

Таким чином, задача, яка описується сумою положень (1)÷(8), є комбінованою, тобто відноситься як до класу задач комбінаторної оптимізації, так і до класу задач трасування.

Особливості моделі моніторингу БПЛА рівня забруднення екосистеми внаслідок аварій на об'єктах ядерної енергетики:

- цільова функція визначається в процесі розв'язання задачі;
- обмеження (2)÷(4) є нелінійними, а (5)÷(8) – дискретними;
- загальна кількість обмежень дорівнює $N_C + 2N_S + 2N^{\text{БПЛА}}N_{T_i}$.

Слід відзначити, що для визначення початкових розмірів комірки регулярної сітки s_x' та s_y' можна скористатися, наприклад, дослідженням поля радіоактивного забруднення внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС. Далі, в процесі розв'язання задачі, розміри комірки коригуються відповідно до обмежень (2) та (3).

Запропонована у самому загальному вигляді динамічна модель оперативного моніторингу рівня забруднення екосистеми внаслідок аварій на об'єктах ядерної енергетики потребує подальшого ретельного дослідження та можливого спрощення по складових її обмеженнях.

Висновки

1. Розроблені науково-технічні основи створення комплексної функціональної схеми системи моніторингу радіоактивного забруднення екосистеми внаслідок аварій на об'єктах ядерної енергетики. Схема характеризується тим, що для підвищення оперативності моніторингу сумісно застосовуються стаціонарні пости радіаційного моніторингу та наземні тимчасові пристрої контролю факторів небезпеки, які доставляються в зону НС за допомогою БПЛА.

2. Розроблена система моніторингу дозволяє проводити доставку в зону радіоактивного забруднення наземних тимчасових автоматизованих пристроїв контролю факторів небезпеки за допомогою БПЛА, для чого розроблені схеми покриття зони радіаційного забруднення касетним та одиночним способами доставки пристроїв контролю. Запропонована система моніторингу передбачає розташування диспетчерського пункту отримання й обробки інформації та обладнання для старту БПЛА на наземній рухомій платформі (штабний автомобіль; пожежно-рятувальний автомобіль; автомобіль радіаційної, хімічної та біологічної розвідки; бронетранспортер; машина військової розвідки; тягач та ін.).

3. Здійснено побудову моделі проведення моніторингу радіоактивного забруднення екосистеми внаслідок аварії на об'єктах ядерної енергетики за допомогою сумісного застосування стаціонарних постів радіаційного моніторингу, БПЛА та наземних тимчасових пристроїв контролю факторів небезпеки. Зроблено висновок, що задача (1)÷(8) є комбінованою, тобто відноситься як до класу задач комбінаторної оптимізації, так і до класу задач трасування. З урахуванням сказаного потребує розробки комплексного рішення поставленої задачі, оскільки подальше дослідження особливостей розробленої моделі дозволить суттєво оптимізувати час доставки тимчасових автоматизованих пристроїв контролю факторів небезпеки в зону НС та підвищити достовірність отриманих результатів. В результаті успішного розв'язання задачі (1)÷(8) подальші дослідження будуть направлені на розробку методу моніторингу радіоактивного забруднення екосистеми внаслідок аварії на об'єктах ядерної енергетики за допомогою сумісного застосування стаціонарних постів радіаційного моніторингу, БПЛА та наземних тимчасових пристроїв контролю факторів небезпеки.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.dsns.gov.ua/>
2. Аналітичний огляд стану техногенної та природної безпеки в Україні за 2016 рік [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.dsns.gov.ua/ua/Analitichniy-oglyad-stanu-tehnogennoyi-ta-prirodnoyi-bezpeki-v-Ukrayini-za-2015-rik.html>
3. Андронов В.А. Природні та техногенні загрози, оцінювання небезпек / В.А. Андронов, А.С. Рогозін, О.М. Соболев, В.В. Тютюник, Р.І. Шевченко – Харків: Національний університет цивільного захисту України, 2011. – 264 с.
4. Черногор Л.Ф. Фізика и екологія катастроф / Л.Ф. Черногор – Харків: Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, 2012. – 556 с.
5. Романченко І.С. Екологічна безпека: екологічний стан та методи його моніторингу / І.С. Романченко, А.І. Сбітнев, С.Г. Бутенко – Київ, 2006. – 560 с.
6. Батлук В.А. Радіаційна екологія / В.А. Батлук – Київ: Знання, 2006. – 560 с.

7. Перепелятников Г.П. Основы общей радиозологии / Г.П. Перепелятников – Киев: Атика, 2008. – 460 с.
8. Васильев Н.В. Медико-социальные последствия ядерных катастроф (Семипалатинск – Алтай, Южный Урал, полигон «Северный – Новая Земля», Чернобыль) / Н.В. Васильев, В.И. Мальцев, В.М. Коваленко, В.М. Шубик, В.Ф. Москаленко, Ю.Л. Волянский, Т.И. Коляда, В.М. Пономаренко, З.М. Парамонов – Киев: «Здоровье», 1999. – 296 с.
9. Сліпченко В.Г. Еколого-економічні збитки: кількісна оцінка / В.Г. Сліпченко, Є.В. Брикун, В.В. Дергачова [та ін.]; За ред. І.В. Недіна. – Київ: ІВЦ «Видавництво Політехніка», 2001. – 216 с.
10. Калугін В.Д. Енергетичний підхід до оцінки екологічного стану природно-техногенно-соціальної системи України в режимі повсякденного функціонування / В.Д. Калугін, В.В. Тютюник, Л.Ф. Черногор, Р.І. Шевченко // Збірник наукових праць Севастопольського національного університету ядерної енергії та промисловості. – Севастополь: Севастопольський національний університет ядерної енергії та промисловості, 2013. – Вип. 4(48). – С. 196–208.
11. Чернявский И.Ю. Анализ условий для создания системы выявления и оценки уровня радиационной безопасности жизнедеятельности населения при чрезвычайных ситуациях военного характера / И.Ю. Чернявский, В.В. Тютюник, В.Д. Калугин // Проблемы надзвичайних ситуацій. – Харків: Національний університет цивільного захисту України, 2016. – Вип. 23. – С. 168–185.
12. Коба К.М. Моделі і методи розв'язання задач маршрутизації при ліквідації наслідків техногенних аварій: автореф. дис. ... к.т.н.: спец. 01.05.02 "Математичне моделювання та обчислювальні методи" / К.М. Коба. – Х., 2005. – 21 с.
13. Рапута В.Ф. Модели реконструкции полей радиоактивного загрязнения территорий после ядерных взрывов / В.Ф. Рапута // Ползуновский вестник №4-2, 2011. – С. 133–137.
14. В МАГАТЭ презентovali беспилотники для радиационного мониторинга [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.atomic-energy.ru/news/2013/05/29/41898>.
15. Система послеаварийного мониторинга АЭС с использованием беспилотных летательных аппаратов: концепция, принципы построения / [А.А. Саченко, В.В. Кочан, В.С. Харченко, М.А. Ястребенецкий, Г.В. Фесенко, М.Э. Яновский] // Ядерна та радіаційна безпека 1(73), 2017. – С. 24–29.
16. Бабак С.В. Мониторинг окружающей среды АЭС с использованием систем видеонаблюдения и измерения мощности экспозиционной дозы на базе беспилотного авиационного комплекса / С.В. Бабак // Системи обробки інформації, 2015. – Вип. 7(132). – С. 190–194.
17. Безпілотні літальні апарати радіаційної розвідки і сільськогосподарського призначення: [монографія] / [В.Я. Канченко, Р.В. Карнаушенко, О.О. Ключников, О.П. Мариношенко, М.Л. Челур] – Чернобыль (Київ. обл.): Ін-т проблем безпеки АЕС, 2015. – 180 с.
18. Тютюник В.В. Розробка науково-технічних основ системи моніторингу зони надзвичайної ситуації, яка включає доставку автоматизованих пристроїв контролю повітряними безпілотними засобами / В.В. Тютюник, В.Д. Калугін, Л.Ф. Черногор, Р.І. Шевченко // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – Харків: Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 2014. – №3(16). – С. 41–44.
19. Бабушкин Ю.Н. Применение спутниковой навигации при действиях в экстремальных условиях / Ю.Н. Бабушкин // Информост. – 2001. – № 3. – С. 74–85.
20. Пат. 49115 Україна, МПК(2009) G08C19/00, G08B19/00, G08B21/00. Система раннього виявлення надзвичайних ситуацій / Йора А.П., Сидоров С.М. – № u201002449; заявл. 04.03.2010; опубл. 12.04.2010, бюл. № 7.

21. Пат. 60922 Україна, МПК(2011.01) G01V3/00. Спосіб оперативного визначення ризиків надзвичайних ситуацій / Якорнов Є.А., Липчеська І.Л., Лисенко О.І., Романченко І.С., Андрієвська О.А., Чумаченко С.М., Туровець Ю.С., Крюченко Н.О.; Власники патенту: Якорнов Є.А., Липчеська І.Л., Лисенко О.І., Романченко І.С., Андрієвська О.А. – № u201101676; заявл. 14.02.2011; опубл. 25.06.2011, бюл. № 12.
22. Пат. 105339 Україна, МПК(2016.01) B64D1/08 (2006.01), G08B19/00, G08B25/00, G08B26/00. Пристрій для скидання автоматизованих засобів контролю факторів небезпеки та вантажів для постраждалих з безпілотного літального апарату / Андронов В.А., Калугін В.Д., Тютюник В.В., Тютюник Ю.В.; Власник патенту: Національний університет цивільного захисту України. – № u201510075; заявл. 15.10.2015; опубл. 10.03.2016, бюл. № 5.
23. Пат. 114393 Україна, МПК(2017.01) B64D1/02 (2006.01), G08B19/00, G08B17/00, G08B21/00. Пристрій для скидання автоматизованих засобів контролю небезпечних факторів надзвичайних ситуацій з безпілотного літального апарату / Андронов В.А., Калугін В.Д., Левтеров О.А., Тютюник В.В., Тютюник Ю.В.; Власник патенту: Національний університет цивільного захисту України. – № u201608736; заявл. 11.08.2016; опубл. 10.03.2017, бюл. № 5.
24. Тютюник В.В. Оцінка ефективності покриття території надзвичайної ситуації за допомогою автоматизованих пристроїв контролю небезпечних факторів при їх розкиданні із зависаючого над точкою скидання безпілотного літального апарату / В.В. Тютюник, В.Д. Калугін, Г.В. Іванець, М.Г. Іванець, Ю.В. Захарченко // Техногенно-екологічна безпека та цивільний захист. – Київ: Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України, 2016. – Вип. 10. – С. 34–43.
25. Іванець Г.В. Алгоритм оцінки ефективності покриття території надзвичайної ситуації автоматизованими пристроями контролю небезпечних факторів при їх розкиданні з безпілотного літального апарату в умовах нестабільностей повітряного середовища / Г.В. Іванець, В.В. Тютюник, В.Д. Калугін, Б.Б. Поспелов, Ю.В. Захарченко // Проблеми надзвичайних ситуацій. – Харків: Національний університет цивільного захисту України, 2017. – Вип. 25. – С. 45–56.
26. Андронов В.А. Науково-конструкторські основи створення комплексної системи моніторингу надзвичайних ситуацій в Україні: Монографія / В.А. Андронов, М.М. Дівізінюк, В.Д. Калугін, В.В. Тютюник. – Харків: Національний університет цивільного захисту України, 2016. – 319 с.
27. Калугін В.Д. Розробка науково-технічних основ для створення системи моніторингу, попередження та ліквідації надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру та забезпечення екологічної безпеки / В.Д. Калугін, В.В. Тютюник, Л.Ф. Черногор, Р.І. Шевченко // Системи обробки інформації. – Харків: Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 2013. – Вип. 9(116). – С. 204–216.
28. Кодекс цивільного захисту України від 2 жовтня 2012 року № 5403-VI // Голос України. – 2012.– листопад (№ 220(5470)). – С. 4–20.
29. Постанова Кабінету Міністрів України від 9 січня 2014 року № 11 «Про затвердження Положення про Єдину державну систему цивільного захисту» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/11-2014-%D0%BF>
30. Розпорядження КМУ від 25 січня 2017 р. №61 р. «Про схвалення Стратегії реформування системи Державної служби України з надзвичайних ситуацій» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/61-2017-%D1%80>.

Стаття надійшла до редакції 16.01.2020 і прийнята до друку після рецензування 03.03.2020

REFERENCES

1. Nacionaljna dopovidj pro stan tekhnoghennoji ta pryrodnoji bezpeky v Ukrajinu. (n.d.). Retrieved January 18, 2020, from <https://www.dsns.gov.ua/> (in Ukrainian)
2. Analitchnyj oghljad stanu tekhnoghennoji ta pryrodnoji bezpeky v Ukrajinu za 2016 rik. (n.d.). Retrieved January 18, 2020, from <http://www.dsns.gov.ua/ua/Analitchniy-oglyad-stanu-tehnoghennoji-ta-pryrodnoji-bezpeki-v-Ukrajinu-za-2016-rik.html> (in Ukrainian)
3. Andronov, V.A., Roghozin, A.S., Sobolj, O.M., Tuituinyk, V.V. & Shevchenko, R.I. (2011). *Pryrodni ta tekhnoghenni zaghrozy, ocinjvannja nebezpek*. Kharkiv: Nacionalnyj universytet cyvilnogho zakhystu Ukrajinu. (in Ukrainian)
4. Chernogor, L.F. (2012). *Fizika i ekologiya katastrof*. Kharkiv: Kharjkovskij nacyonalnij unyversytet ymeny V.N. Karazyna. (in Russian)
5. Romanchenko, I.S., Sbitnjev, A.I. & Butenko, S.Gh. (2006). *Ekologhichna bezpeka: ekologhichnyj stan ta metody jogho monitorynghu*. Kyiv. (in Ukrainian)
6. Batluk, V.A. (2006). *Radiacijna ekologhija*. Kyiv: Znannya. (in Ukrainian)
7. Perepelyatnikov, G.P. (2008). *Osnovy obshchey radioekologii*. Kiev: Atika. (in Russian)
8. Vasil'ev, N.V., Mal'tsev, V.I., Kovalenko, V.M., Shubik, V.M., Moskalenko, V.F., Volyanskiy, Yu.L., Kolyada, T.I., Ponomarenko, V.M. & Paramonov, Z.M. (1999). *Mediko-sotsial'nye posledstviya yadernykh katastrof (Semipalatinsk – Altay, Yuzhnyy Ural, poligon «Severnnyy – Novaya Zemlya», Chernobyl')*. Kiev: «Zdorov'e». (in Russian)
9. Slipchenko, V.Gh., Brykun, Je.V. & Derghachova, V.V. (2001). *Ekologho-ekonomichni zbytky: kiljkisna ocinka*. Kyiv: IVC «Vydavnytstvo Politekhnika». (in Ukrainian)
10. Kalughin, V.D., Tuituinyk, V.V., Chornogor, L.F. & Shevchenko, R.I. (2013). Energhetychnyj pidkhyd do ocinky ekologhichnogho stanu pryrodno-tekhnoghenno-socialnoji systemy Ukrajinu v rehymy povsjakdennogho funkcionuvannja. *Zbirnyk naukovykh pracj Sevastopol'skoghho nacionalnogho universytetu jadernoji energhiji ta promyslovosti*, 4(48), 196-208. (in Ukrainian)
11. Chernyavskiy, I.Yu., Tuituinyk, V.V. & Kalugin, V.D. (2016). Analiz usloviy dlya sozdaniya systemy vyyavleniya i otsenki urovnya radiatsionnoy bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti naseleniya pri chrezvyachaynykh situatsiyakh voennogo kharaktera. *Problemy nadzvychajnykh sytuacij*, 23, 168-185. (in Russian)
12. Koba, K.M. (2005). Modeli i metody rozv'jazannja zadach marshrutyzaciji pry likvidaciji naslidkiv tekhnoghenykh avarij. *Extended abstract of candidate's thesis*. Kharkiv (in Ukrainian)
13. Raputa, V.F. (2011). Modeli rekonstruktsii poley radioaktivnogho zagryazneniya territoriy posle yadernykh vzryvov. *Polzunovskiy vestnik*, 2-4, 133-137. (in Russian)
14. V MAGATE prezentovali bespilotniki dlya radiatsionnogho monitoringa. Retrieved January 18, 2020, from <http://www.atomic-energy.ru/news/2013/05/29/41898>. (in Russian)
15. Sachenko, A.A., Kochan, V.V., Kharchenko, V.S., Yastrebenetskiy, M.A., Fesenko, G.V. & Yanovskiy, M.E. (2017). Sistema posleavariynogho monitoringa AES s ispol'zovaniem bespilotnykh letatel'nykh apparatov: kontseptsiya, printsipy postroeniya. *Jaderna ta radiacijna bezpeka*, 1(73), 24-29. (in Russian)
16. Babak, S.V. (2015). Monitoring okruzhayushchey srody AES s ispol'zovaniem sistem videonablyudeniya i izmereniya moshchnosti ekspozitsionnoy dozy na baze bespilotnogho aviatsionnogho kompleksa. *Systemy obrobky informacii*, 7(132), 190-194. (in Russian)
17. Kanchenko, V.Ja., Karnausenko, R.V., Kljuchnykov, O.O., Marynoshenko, O.P. & Chepur, M.L. (2015). *Bezpilotni litaljni aparaty radiacijnoji rozvidky i sil'jskogho gospodar'skogho pryznachennja: [monoghrafija]*. Chornobylj (Kyiv. obl.): In-t problem bezpeky AES. (in Ukrainian)
18. Tuituinyk, V.V., Kalughin, V.D., Chornogor, L.F. & Shevchenko, R.I. (2014). Rozrobka naukovo-tekhnichnykh osnov systemy monitorynghu zony nadzvychajnoji sytuaciji, jaka vkljuchaje dostavku avtomatyzovanykh prystrojiv kontrolju povitranymy bezpilotnymy zasobamy. *Nauka i tekhnika Povitranjnykh Syl Zbrojnykh Syl Ukrajinu*, 3(16), 41-44. (in Ukrainian)

19. Babushkin, Yu. N. (2001). Primenenie sputnikovoy navigatsii pri deystviyakh v ekstremal'nykh usloviyakh. *Informost*, 3, 74-85. (in Russian)
20. Pat. 49115 Ukraïna, MPK(2009) G08C19/00, G08B19/00, G08B21/00. Systema rannjogho vyjavlennja nadzvyčajnykh sytuacij / Jora A.P., Sydorov S.M. – # u201002449; zajavl. 04.03.2010; opubl. 12.04.2010, bjul. # 7. (in Ukrainian)
21. Pat. 60922 Ukraïna, MPK(2011.01) G01V3/00. Sposib operatyvnogho vyznachennja ryzykiv nadzvyčajnykh sytuacij / Jakornov Je.A., Lipchevsjka I.L., Lysenko O.I., Romanchenko I.S., Andrijevsjka O.A., Chumachenko S.M., Turovecj Ju.S., Krjuchenko N.O.; Vlasnyky patentu: Jakornov Je.A., Lipchevsjka I.L., Lysenko O.I., Romanchenko I.S., Andrijevsjka O.A. – № u201101676; zajavl. 14.02.2011; opubl. 25.06.2011, bjul. № 12. (in Ukrainian)
22. Pat. 105339 Ukraïna, MPK(2016.01) B64D1/08 (2006.01), G08B19/00, G08B25/00, G08B26/00. Prystrij dlja skydannja avtomatyzovanykh zasobiv kontrolju faktoriv nebezpeky ta vantazhiv dlja postrazhdalych z bezpilotnogho litaljnogho aparatu / Andronov V.A., Kalughin V.D., Tjutjunyk V.V., Tjutjunyk Ju.V; Vlasnyk patentu: Nacionaljnij universytet cyviljnogho zakhystu Ukraïny. – № u201510075; zajavl. 15.10.2015; opubl. 10.03.2016, bjul. # 5. (in Ukrainian)
23. Pat. 114393 Ukraïna, MPK(2017.01) B64D1/02 (2006.01), G08B19/00, G08B17/00, G08B21/00. Prystrij dlja skydannja avtomatyzovanykh zasobiv kontrolju nebezpečnykh faktoriv nadzvyčajnykh sytuacij z bezpilotnogho litaljnogho aparatu / Andronov V.A., Kalughin V.D., Ljevtjerov O.A., Tjutjunyk V.V., Tjutjunyk Ju.V; Vlasnyk patentu: Nacionaljnij universytet cyviljnogho zakhystu Ukraïny. – # u201608736; zajavl. 11.08.2016; opubl. 10.03.2017, bjul. # 5. (in Ukrainian)
24. Tuituinyk, V.V., Kalughin, V.D., Ivanecj, Gh.V., Ivanecj, M.Gh. & Zakharchenko, Ju.V. (2016). Ocinka efektyvnosti pokryttja terytoriji nadzvyčajnoji sytuaciji za dopomoghoju avtomatyzovanykh prystrojiv kontrolju nebezpečnykh faktoriv pry jikh rozkydanni iz zavysajuchoho nad točkoju skydannja bezpilotnogho litaljnogho aparatu. *Tekhnoghenno-ekologichna bezpeka ta cyviljnij zakhyst*, 10, 34-43. (in Ukrainian)
25. Ivanecj, Gh.V., Tuituinyk, V.V., Kalughin, V.D., Pospjelov, B.B. & Zakharchenko, Ju.V. (2017). Alghorytm ocinky efektyvnosti pokryttja terytoriji nadzvyčajnoji sytuaciji avtomatyzovanykh prystrojamy kontrolju nebezpečnykh faktoriv pry jikh rozkydanni z bezpilotnogho litaljnogho aparatu v umovakh nestabiljnestej povitranogho seredovyssha. *Problemy nadzvyčajnykh sytuacij*, 25, 45-56. (in Ukrainian)
26. Andronov, V.A., Divizinjuk, M.M., Kalughin, V.D. & Tuituinyk, V.V. (2016). *Naukovo-konstruktorsjki osnovy stvorennja kompleksnoji systemy monitorynghu nadzvyčajnykh sytuacij v Ukraïni*: Monoghrafija. (in Ukrainian)
27. Kalughin, V.D., Tuituinyk, V.V., Chornoghor, L.F. & Shevchenko, R.I. (2013). Rozrobka naukovo-tehničnykh osnov dlja stvorennja systemy monitorynghu, poperedzhennja ta likvidaciji nadzvyčajnykh sytuacij pryrodnogho ta tekhnoghennogho kharakteru ta zabezpečennja ekologichnoji bezpeky. *Systemy obrobky informaciji*, 9(116), 204-216. (in Ukrainian)
28. Kodeks cyviljnogho zakhystu Ukraïny vid 2 zhovtnja 2012 roku № 5403-VI. (2012). Gholos Ukraïny. (in Ukrainian)
29. Postanova Kabinetu Ministriv Ukraïny vid 9 sichnja 2014 roku № 11 «Pro zatverdzhennja Polozhennja pro Jedynu derzhavnu systemu cyviljnogho zakhystu». Retrieved January 18, 2020, from <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/11-2014-%D0%BF>. (in Ukrainian)
30. Rozporjadzhennja KMU vid 25 sichnja 2017 r. №61 «Pro skhvalennja Strateghiji reformuvannja systemy Derzhavnoji sluzhby Ukraïny z nadzvyčajnykh sytuacij». Retrieved January 18, 2020, from <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/61-2017-%D1%80>. (in Ukrainian)

The article was received 16.01.2020 and was accepted after revision 03.03.2020

Тютюник Вадим Володимирович

доктор технічних наук, старший науковий співробітник, начальник кафедри управління та організації діяльності у сфері цивільного захисту Національного університету цивільного захисту України

Адреса робоча: Україна, м. Харків, вул. Чернишевська, 94

e-mail: tutunik_v@ukr.net

ORCID ID 0000-0001-5394-6367

Соболь Олександр Миколайович

доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри управління та організації діяльності у сфері цивільного захисту Національного університету цивільного захисту України

Адреса робоча: Україна, м. Харків, вул. Чернишевська, 94

ORCID ID 0000-0002-7133-6519

Калугін Володимир Дмитрович

доктор хімічних наук, професор, професор кафедри спеціальної хімії і хімічної технології Національного університету цивільного захисту України

Адреса робоча: Україна, м. Харків, вул. Чернишевська, 94

ORCID ID 0000-0002-6899-1010

Захарченко Юлія Вадимівна

аспірантка Науково-дослідної установи «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем»

Адреса робоча: Україна, м. Харків, вул. Бакуліна, 6

ORCID ID 0000-0003-1978-2818