

УДК 551.463.2 + 621.03.9

Т. В. Качур, к.т.н., ст. викл. каф. (ORCID 0000-0002-1683-956X)
В. О. Собина, к.т.н., доцент, нач. каф. (ORCID 0000-0001-6908-8037)
Д. В. Тарадуда, к.т.н., заст. нач. каф. (ORCID 0000-0001-9167-0058)
М. О. Демент, к.пед.н., доц. каф. (ORCID 0000-0003-4975-384X)
Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗАПОБІГАННЯ НАДЗВИЧАЙНИМ СИТУАЦІЯМ, ВИКЛИКАНИХ ПОЖЕЖАМИ РАДІОАКТИВНО-ЗАБРУДНЕНИХ ЛІСІВ

Теоретично обґрунтовано математичну модель запобігання надзвичайним ситуаціям, викликаних пожежами в радіоактивно-забруднених лісових масивах. Модель являє собою систему з трьох аналітичних залежностей: перша дозволяє обчислювати ймовірність виявлення радіоактивного передвісника пожежі лісового масиву в залежності від геометричних розмірів контрольованого району лісу, часу пошуку і пошукових зусиль, що прикладаються і визначаються стратегіями пошуку; друга дозволяє розрахувати значення пошукових зусиль (пошукової продуктивності) в залежності від геометричних розмірів радіоактивної аномалії і дальностей її виявлення основним і додатковим каналами; третя визначає дальності виявлення радіоактивної аномалії в залежності від швидкості і висоти польоту безпілотних літальних апаратів. Проведено експериментальну перевірку працездатності запропонованої математичної моделі за допомогою лабораторної установки і методики проведення експериментів з її використанням. Так встановлено, що особливо на ранніх стадіях загоряння, працює сферичний закон: фронт хвилі розширюється як стінки циліндра, і інтенсивність випромінювання зменшується пропорційно відстані. Це означає, що внаслідок релаксаційних процесів, що відбуваються в атмосфері, відбувається загасання випромінювання на величину, конкретне значення якої залежить від частоти випромінювання і деяких фізичних параметрів приземних шарів атмосфери. Врахування отриманих у роботі результатів при запобіганні розвитку надзвичайної ситуації викликані пожежею в радіоактивно-забрудненому лісовому масиві дозволяє приймати керівнику ліквідації надзвичайної ситуації правильні управлінські рішення та забезпечити безпечні умови роботи для рятувальників. Подальші дослідження планується присвятити розробці методики прогнозування надзвичайних ситуацій, викликаних пожежами радіоактивно-забруднених лісів з використанням розвідувальних безпілотних літальних апаратів.

Ключові слова: надзвичайна ситуація, радіоактивне забруднення, запобігання надзвичайним ситуаціям, пожежа, лісовий масив, безпілотний літальний апарат, математична модель

1. Вступ

Український народ на собі випробував, що таке наслідки ядерної катастрофи. На сьогоднішній день існує тридцяти-кілометрова Чорнобильська зона відчуження, де крім відвалів з радіоактивними речовинами стоять старі і молоді ліси, що ввібрали в себе радіонукліди, які знаходяться в ґрунтах і ґрунтових водах. Якщо в перші роки після Чорнобильської катастрофи дерева в радіоактивно-забруднених лісах мали явно виражений бурий окрас хвої, то тепер молоді дерева зовні нічим не відрізняються від звичайних.

Особливість поширення радіоактивних продуктів горіння при надзвичайних ситуаціях (далі – НС) в радіоактивно-забруднених лісових масивах полягає в тому, що частина з них переходить в газоподібні і нано-структури, які схильні до трансконтинентального переносу, тобто пожежа радіоактивно-забрудненого лісового масиву може привести до радіоактивного забруднення місцевості за сотні і тисячі кілометрів від місця загоряння.

Для захисту населення у випадку таких НС, а також для ефективного

виконання попереджувальних заходів адміністративні органи і Державна служба України з надзвичайних ситуацій повинні володіти достовірною інформацією про виникнення НС в радіоактивно-забруднених лісах.

У зв'язку з вище наведеним, виникає актуальна на сьогоднішній день наукова проблема – висока потенційна небезпека НС, пов'язаних з пожежами радіоактивно-забруднених лісових масивів.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Для вирішення поставленої наукової проблеми необхідно провести аналіз літературних даних щодо запобігання НС, викликаних пожежами в радіоактивно-забруднених лісових масивів.

Детальний аналіз існуючих методів і способів прогнозування НС, спровокованих лісовими пожежами наведено в [1]. Що ж до попередження НС, то одним із ефективних методів є [2] – визначення джерела виникнення пожежі зі штучних супутників Землі. Наявність супутникових даних високої просторової роздільної здатності на основі геоінформаційної системи (ГІС) дозволяє не тільки виявляти пожежі, зпрогнозувати їх наслідки, але і, проаналізувавши отриману інформацію, розробити комплекс заходів з попередження її розвитку. В системі використовуються дані п'ятиканального радіометра AVHRR в поєднанні з пороговими алгоритмами виявлення осередків полум'я, які базуються на застосуванні сукупності фіксованих граничних значень до вимірювальних характеристик інтенсивності вихідного випромінювання. Основними інформативними ознаками тут є радіаційна температура і різниця температур. Основними недоліками даної системи є:

низька точності виявлення осередків пожежі;

необхідність розробки загальної математичної моделі запобігання НС, викликаних пожежами, яка дозволить удосконалити методику їх запобігання.

Робота [3] направлена привернути увагу наукового співтовариства і влади європейських країн до прогнозованих ризиків, пов'язаних з перерозподілом радіоактивності в Європі. Використовуючи тимчасову частоту пожеж, що сталися в цьому районі протягом 2010 року, вивчено три сценарії, припускаючи, що згоріло 10%, 50% і 100% площі лісових масивів. Була використана глобальна модель LMDZORINCA, яка зчитує щільність випадання радіонуклідів і площі спалень із супутників, тоді як ризики для людей і тварин розраховувалися з використанням лінійної безпорогової моделі (LNT) і комп'ютерного програмного забезпечення ERICA Tool, відповідно. Однак, при застосуванні такого підходу існують складнощі з перевіркою адекватності отриманих даних.

У [4] пропонується методика підтримки прийняття рішень при ліквідації НС, пов'язаних з лісовими пожежами на забруднених землях і система зниження ризиків. Розглядається проблема моніторингу пожежної небезпеки лісових масивів на прикладі використання сучасних систем виявлення і гасіння пожеж в зонах радіоактивного забруднення. Дано докладний опис використання геоінформаційних систем (ГІС) в профілактиці, виявленні і гасінні лісових пожеж. У роботі використовувалася система класифікації пожежної небезпеки на основі інвентаризації дерев, інформації про насадженнях та прогнози зростання лісів для оцінки фактичних і майбутніх ризиків пожеж і викидів в атмосферу радіонуклідів. Проте, дана робота направлена більше на оцінку екологічної загрози, ніж на реалізацію заходів із запобігання НС, про це ж говорить відсутність математичного апарату їх попередження.

У [5] запропоновано новий системний підхід для моніторингу лісових пожеж на великих територіях. Створена архітектура комплексу, а також ефективні методи централізації і прийняття рішень. Науково-технічна задача полягає в створенні системи розподіленого відеоспостереження для вирішення завдання раннього виявлення лісових пожеж. У статті розглядаються існуючі підходи виявлення пожеж: використання спеціалізованих вишок, методи виявлення пожеж з повітря, з використанням літальних апаратів різного класу, глобальний підхід для моніторингу лісових пожеж з використанням системи супутникового моніторингу, системи відеомоніторингу. Запропонована в роботі система призначена для виявлення лісових пожеж та визначення їх просторових координат, в масштабі реального часу. Для функціонування комплексу можуть бути використані вишки операторів зв'язку і існуюче інфокомунікаційне середовище передачі даних. В роботі проаналізовано існуючі підходи до моніторингу лісових пожеж, однак питання запобігання розглядається поверхово. Крім того робота направлена на представлення апаратних засобів, розробка математичних залежностей фізичних процесів не наведена.

В [6] розглянуто соціально-екологічну проблему, яка потребує дефрагментації існуючих систем управління ризиками та прийняття численних короткострокових і довгострокових заходів щодо попередження та зниження впливу викидів радіонуклідів в результаті лісових пожеж в Білорусі, Україні та Росії. Розроблена система моделювання ризиків лісових пожеж призначена для прогнозування ймовірності вогнищ виникнення великих пожеж і місць, де загоряння природних пожеж, швидше за все, призведе до значного повторного аерозолювання радіонуклідів (наприклад, ^{137}Cs). Результати моделювання показали, як діяльність людини впливає на режими пожежі і ймовірність її виникнення на забруднених територіях. Зокрема, запропонована система моделювання може використовуватися для вивчення широкого спектру сценаріїв управління пожежами на забруднених територіях і внесення вкладу в комплексну стратегію управління пожежами, націлену на конкретні чинники загоряння, за рахунок використання декількох інструментів, включаючи довгострокове управління лісовим фондом. Однак, основний акцент в даній роботі зроблено на розробку стратегії управління пожежами, яка об'єднує виявлення, їх локалізацію та ліквідацію. Питання запобігання розвитку НС, пов'язаних з пожежами у вигляді математичних моделей не розглядалися.

Методика дослідження [7] враховує детерміновані та стохастичні особливості окремих стадій процесу пожежі, який представлений у вигляді послідовності явищ, характеристик та кінцевого результату. При визначенні узагальненої методології дослідження для досягнення поставленої мети, тобто оцінки ситуації в майбутньому, автор виходив із посилання, що більш-менш детальне математичне моделювання на базі математичних рівнянь переносу з урахуванням непередбаченості конкретних метеоумов, характеристик пожежі дає результат, який буде так само імовірним, як і результат, одержаний з використанням більш спрощених методів. Однак при застосуванні даного математичного апарату не враховуються передвісники пожеж лісових масивів взагалі і розташованих в зоні радіоактивного забруднення зокрема.

Ідея роботи [8] полягає в розробленні методики прогнозування ризиків та запобігання виникненню пожеж на території лісового фонду зони відчуження з урахуванням світового досвіду. Робота спрямована на попередження виникнення

лісових пожеж, забезпечення можливості їх гасіння на початковій стадії розвитку, а також зменшення кількості лісових пожеж та збитків від них. Суттєвим недоліком даної роботи є відсутність математичного апарату, який би описував взаємопов'язаність фізичних процесів, які виникають напередодні та на початковій стадії НС, пов'язаної з пожежею.

У [9] наведено методологічний підхід до оцінки викидів радіонуклідів із джерела вогню. Запропонований підхід дозволив використовувати емпіричні дані для щорічного ефективного розрахунку дози для пожежних та для місцевого населення на відстані середньої дальності. Однак у статті наголошується про необхідність розробити наукових рекомендацій щодо підвищення ефективності запобігання стихійних пожеж на територіях, забруднених радіонуклідами та на відсутність науково обґрунтованих моделей виникнення пожежі на забруднених радіонуклідами територіях (особливо для територій поблизу великих міст з більш-менш низьким рівнем щільності забруднення), що безумовно підтверджує актуальність нашого наукового дослідження.

Таким чином, невирішеною частиною проблеми є відсутність математичного апарату, що описує процес запобігання НС, пов'язаних з пожежами радіоактивно-забруднених лісових масивів.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є розробка математичної моделі запобігання надзвичайним ситуаціям, викликаних пожежами лісових масивів, підданих радіоактивному забрудненню.

Досягнення поставленої мети потребує вирішення наступних завдань:

теоретично обґрунтувати математичну модель запобігання надзвичайним ситуаціям, викликаних пожежами в радіоактивно-забруднених лісових масивах;

перевірити працездатність запропонованої математичної моделі за допомогою лабораторної установки.

4. Теоретичне обґрунтування математичної моделі запобігання надзвичайним ситуаціям

Головна ідея запобігання НС, викликаних пожежею радіоактивно-забрудненого лісового масиву, полягає в тому, щоб своєчасно виявити джерело загоряння шляхом виявлення радіаційних провісників [10]. З цієї точки зору математична модель, що описує процеси, які при цьому відбуваються, повинна забезпечити розрахунок ефективності пошуку з використанням безпілотних літальних апаратів, оснащених відповідною апаратурою. Одним з критеріїв оцінки ефективності пошуку є ймовірність виявлення об'єкта пошуку.

Ймовірність виявлення визначається співвідношенням, а саме:

$$P\{(t, t + \Delta t)/(0, t)\} = 1 - \Delta t \int_{\Omega} \lambda(x, t) u(x, t) dx + o(\Delta t), \quad (1)$$

де $\lambda(x, t)$ – функція, яка визначається стратегією пошуку і є ймовірністю виявлення цілі в інтервалі часу $(t, t + \Delta t)$ за умови, що ціль знаходиться в точці і не виявлена до моменту t ; $u(x, t)$ – щільність розподілу цілі (щільність апостеріорного розподілу положення цілі), коли вона залежить від часу;

$P\{(t, t + \Delta t)/(0, t)\}$ – ймовірність виявлення цілі, що знаходиться в малій околиці Δx , яка містить точку x , і не виявлена протягом часу $(0, t)$; Ω – область декартового простору, в якому проводиться пошук нерухомій цілі – джерела загоряння лісового масиву.

Перша початкова умова враховує, що пошук здійснюється в двохкоординатній системі. Для обліку другої початкової умови, що полягає в тому, що джерело загоряння нерухоме і розвивається, збільшуючи свої геометричні розміри і змінюючи фізичні характеристики, що впливають на його виявлення, використовуємо формулу (2), отриману з (1), тобто:

$$P(T) = 1 - \int_{\Omega} u(x) \exp\left(-\int_0^T \lambda(x, \tau) d\tau\right) dx, \quad (2)$$

де T – заданий час пошуку або рішення пошукової задачі.

Вводячи позначення пошукового зусилля у вигляді $\varphi(x, T) = \int_0^T \lambda(x, \tau) d\tau$,

виконуємо третю початкову умову, враховуючи, що пошукове устаткування недосконале і вимагає залучення хоча б одну людину-оператора пошукової системи:

$$P(T) = 1 - \int_{\Omega} u(x) \exp(-\varphi(x, T)) dx. \quad (3)$$

Пошукове зусилля обчислюється із

$$\begin{aligned} \varphi(x, t) &= \frac{1}{2\sigma\sqrt{\pi}} \int_{\min\left(t, g^{-1}\left(\frac{\pi x^4}{4\sigma^2}\right)\right)}^t \left(\frac{L(t)}{\sqrt{\int_0^t L(\tau) d\tau}} \right) dt = \\ &= \max\left(0, \frac{1}{2a^2} \left\{ \sqrt{\frac{4\sigma^2}{\pi} \int_0^t L(\tau) d\tau} - x^2 \right\}\right), \end{aligned} \quad (4)$$

де $g(t) = \int_0^t L(\tau) d\tau$, через функцію загального вигляду $L(t)$ за умови, що $0 < 1 < \infty$, і

існує інтеграл $\int_0^t L(\tau) d\tau$ для всіх $t > 0$, при цьому

$$\varphi(x, t) = \frac{1}{2\sigma\sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{1}{\sigma} \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^t L(\tau) d\tau}\right), \quad (5)$$

що дозволяє врахувати четверте і п'яте початкові умови задачі: пошук здійснюється комплексної (що складається з автономних безпілотних авіаційних носіїв) пошуковою системою, головна властивість якої – дії окремих пошукових одиниць можна представляти за допомогою однієї і тієї ж функції, яка

визначається як стратегії пошуку, і вибір оптимальної стратегії пошуку визначається часом рішення пошукової задачі.

Накладаючи перші дві граничних умови задачі своєчасного виявлення джерела загоряння в радіоактивно-забрудненому лісовому масиві з використанням безпілотних літальних апаратів і виконавши послідовні перетворення, отримаємо:

$$\varphi(x, t) = \frac{1}{2\sigma\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{(x - x_1)^2}{2\sigma_1^2}\right), \quad (6)$$

де $x - x_1$ – протяжність (радіус) радіоактивної аномалії; σ – дальність реєстрації радіоактивної аномалії основним каналом виявлення; σ_1 – дальність реєстрації радіоактивної аномалії додатковим каналом виявлення.

Цей вираз дозволяє врахувати, що: час вирішення задачі пошуку джерела загоряння обмежено часом перебування літальних апаратів в повітрі; висота і швидкість польоту літальних апаратів повинна забезпечувати максимальну дальність виявлення об'єкта пошуку і найбільшу ширину смуги перегляду уздовж маршруту польоту; необхідність додаткового каналу виявлення для ідентифікації виявленої радіаційної аномалії як радіаційної ознаки загоряння радіаційно-забрудненого лісового масиву.

Необхідно також врахувати, що кожен безпілотний літальний апарат під час вирішення завдання пошуку джерела загоряння буде здійснювати політ в районі пошуку Ω . У відповідності зі своїми тактичними та технічними характеристиками він буде перебувати в повітрі час T , який може становити не більше 80-90 % від максимальної тривалості його польоту на крейсерській швидкості на пошуковій висоті, що забезпечують найбільше пошукове зусилля $\varphi(x, T)$. При цьому забезпечується виявлення джерела загоряння (радіоактивної аномалії) на дистанції σ основним каналом виявлення і на дальності σ_1 додатковим каналом виявлення. У даних умовах маємо залежності:

$$\sigma = f(V, H) \text{ і } \sigma_1 = f_1(V, H). \quad (7)$$

Узагальнюючи все вищевикладене, отримаємо систему з трьох залежностей, яка є шуканою математичною моделлю запобігання НС, викликаним пожежами радіоактивних лісових масивів при заданих початкових і граничних умовах

$$\begin{cases} P(T) = 1 - \int_{\Omega} u(x) \exp(-\varphi(x, T)) dx, \\ \varphi(x, t) = \frac{1}{2\sigma\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{(x - x_1)^2}{2\sigma_1^2}\right), \\ \sigma = f(V, H); \quad \sigma_1 = f_1(V, H). \end{cases} \quad (8)$$

«Стеля» або максимальна висота, на яку може підніматися літальні апарати типу лабораторної установки, що пропонується – 15200 м. Мінімальна висота

польоту, на якій літальний апарат стійко тримається в повітрі і виконує завдання пошуку на надмалих висотах, дорівнює 15 м. Пошукова або крейсерська висота польоту, як правило, визначається характером вирішуваних завдань.

Швидкість польоту літальних апаратів типу лабораторної установки: максимальна – 900 км/год, мінімальна – 12 км/год.

Максимальний час перебування в повітрі до 14,5 годин. Найбільший час баражування на великих висотах без урахування літального часу і повернення – від 10 до 12 годин. Найбільший час пошуку на малих висотах – від 8 до 9 годин.

Таким чином, математична модель запобігання НС, викликаним пожежами радіоактивних лісових масивів, являє собою систему з трьох аналітичних залежностей. Перша з них дозволяє обчислювати ймовірність виявлення радіоактивного передвісника пожежі лісового масиву в залежності від геометричних розмірів контрольованого району лісу, часу пошуку і пошукових зусиль, що прикладаються і визначаються стратегіями пошуку. Друга дозволяє розрахувати значення пошукових зусиль (пошукової продуктивності) в залежності від геометричних розмірів радіоактивної аномалії і дальностей її виявлення основним і додатковим каналами. Третя визначає дальності виявлення радіоактивної аномалії в залежності від швидкості і висоти польоту безпілотних літальних апаратів.

5. Перевірка працездатності запропонованої математичної моделі

Для експериментальної перевірки працездатності запропонованої математичної моделі запобігання НС, викликаним пожежами радіоактивних лісових масивів розроблено лабораторну установку, методику і етапи проведення відповідних експериментів на ній.

До складу розробленої лабораторної установки входять: бортовий контролер DJI A2; комплект навігації (GNSS (GPS+ГЛОНАСС+ Галілео); двигуни AXI 2814/22 (Чехія); гвинти APC 14 (карбон); контролери двигунів 60A ESC OEM; бортова камера; відео передавач 5.8ГГц 600мВ; трьохосьовий магнітометр; трьохосьовий гіроскоп; трьохосьовий акселерометр; ультразвуковий датчик (висотомір); рама ОКТО TOP Series (карбон); електронна система стабілізації; система управління Futaba 14i акумулятор 16A 6S Tattoo. Зовнішній вигляд лабораторної установки представлений на рис. 1.

Методика проведення експериментів з використанням лабораторної установки передбачала наступний порядок дій. Визначення польотного завдання – завдання висоти і маршруту польоту, який може виконуватися, як в автономному режимі (режимі автопілота), так і в керованому відповідними командами оператора. Політ лабораторної установки і послідовне обстеження різних ділянок лісового масиву, підданого радіоактивному забрудненню. Обробка отриманих результатів радіаційних вимірювань, отриманих під час обстеження лісових масивів.

Головною умовою реєстрації корисного сигналу на приймальний пристрій є виконання співвідношення, в якому інтенсивність корисного сигналу в δ разів перевищує інтенсивність перешкоди, що впливає на вхід цього ж приймача, тобто

$$I_c \geq \delta I_n, \quad (9)$$

де δ – коефіцієнт розпізнавання приймального пристрою, який визначається як мінімальне відношення інтенсивностей сигналу і перешкоди на вході, що дозволяє реєструвати корисний сигнал із заданими ймовірностями правильного виявлення і помилкової тривоги.



Рис. 1. Зовнішній вигляд лабораторної установки перевірки адекватності математичної моделі запобігання НС, викликаним пожежами радіоактивних лісових масивів

Оскільки кут огляду бортових пошукових систем лабораторної установки дорівнює 90° (45° лівого і правого борту відповідно), то смуга обстеження, буде дорівнювати $0,7 \cdot D$, а при гарантованому виявленні коефіцієнт (ймовірність) контакту складає $0,8-0,9$ за рахунок досить високої швидкості руху лабораторної установки. Тому для ідентифікації аномалії, як об'єкта пошуку, необхідно певний час (рис. 2). У цьому випадку коефіцієнт (ймовірність) пропуску об'єкта пошуку буде дорівнює $0,1-0,2$ і ширина смуги обстеження з одного борту складе $0,5 \cdot D$. Відповідно, загальна ширина смуги обстеження буде дорівнювати найбільшій дальності виявлення.

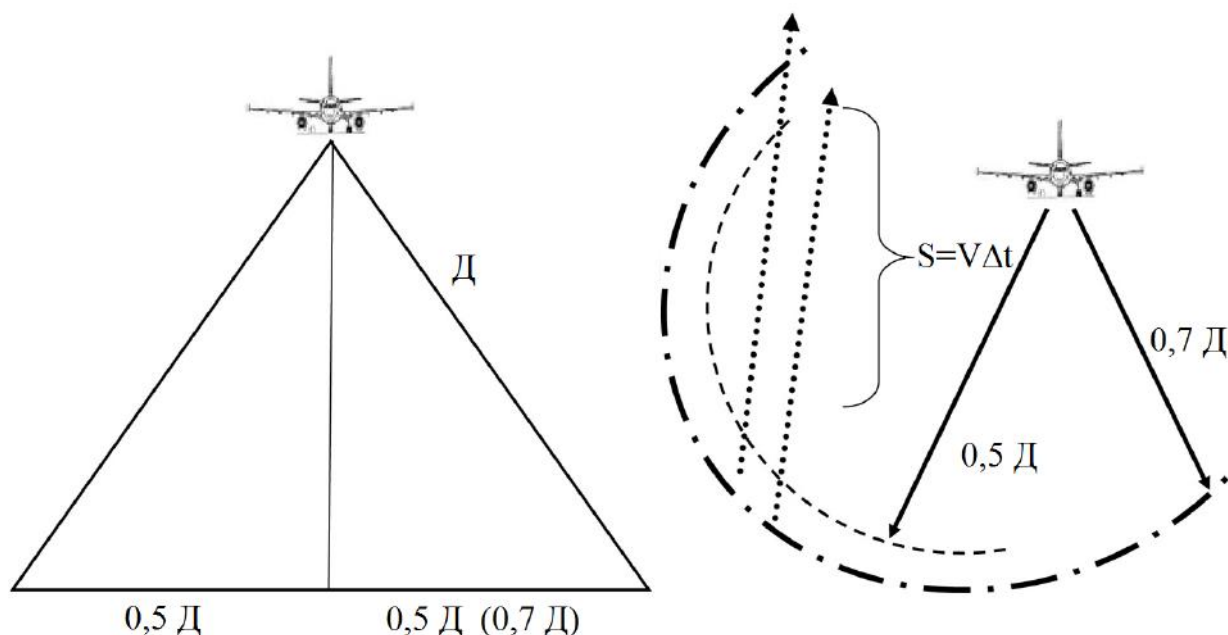


Рис. 2. Схема, яка пояснює формування ширини смуги обстеження

Добуток ширини смуги обстеження на швидкість польоту с визначатиме пошукову продуктивність (площа, що переглядається в одиницю часу) або пошукове зусилля.

Визначення загального часу пошуку і його дискретизації. Знаючи пошукове зусилля однієї лабораторної установки та їх загальне число, отримуємо пошукове зусилля u всієї пошукової системи.

Результат ділення площі контрольованого району Ω на величину пошукового зусилля пошукової системи надасть час, необхідний на одноразове обстеження лісового масиву T_1 . Цей час може бути як менший проміжку часу t – максимального часу перебування лабораторної установки в повітрі, так і більший цього значення. У першому випадку весь контрольований район проглядається при одноразовому обстеженні, а в другому – тільки при дворазовому або багаторазовому обстеженні контрольованого лісового масиву.

Якщо T – час вирішення пошукової задачі, то він, як правило, визначається тривалістю пожежонебезпечного періоду і затверджується керівництвом. Відношення T до T_1 дозволяє визначити дискретність обстеження контрольованого лісового масиву. При пошуку на малих висотах, коли необхідно забезпечити найбільшу ширину перегляду не оптичними каналами, вона складає від 30 до 300 м. У разі вирішення завдань виносного пункту ретрансляції або панорамного спостереження висота баражування дорівнює 15 км. Баражування на великих висотах здійснюється зі швидкістю 150-200 км/год. Політ на малих висотах при проведенні розвідувальних або пошукових рятувальних операцій в інтересах забезпечення найбільшої пошукової продуктивності виконується на швидкостях до 200-300 км/год.

Організація пошуку джерела загоряння. Результати районування за пріоритетами і дискретність обстеження контрольованого лісового масиву є основою організації пошуку джерела загоряння. У нашому випадку можуть бути три варіанти пошуку, а саме: плановий пошук, оперативний пошук і пошук за викликом.

Натурні експерименти, виконані з використанням лабораторної установки, проводилися по одному і тому ж сценарію, визначеному методикою проведення експериментів.

Спочатку формувалося польотне завдання. Вихідні дані визначалися з висоти польоту лабораторної установки 50-100 м зі швидкістю 30-60 км/год. Політ задавався програмою, яка встановлюється в автопілоті лабораторної установки, тривалістю від 40 до 80 хвилин.

Потім лабораторна установка піднімалася в небо і починала політ, як показано на рис. 3.



Рис. 3. Робота запропонованої лабораторної установки

Результати радіаційної зйомки місцевості по системі зв'язку трансливалися в ПК, який перебував з пультом управління польотом лабораторної установки, і фіксувалися в бортовому модулі пам'яті. Після закінчення польоту дані радіаційної зйомки місцевості оброблялися (рис. 4).

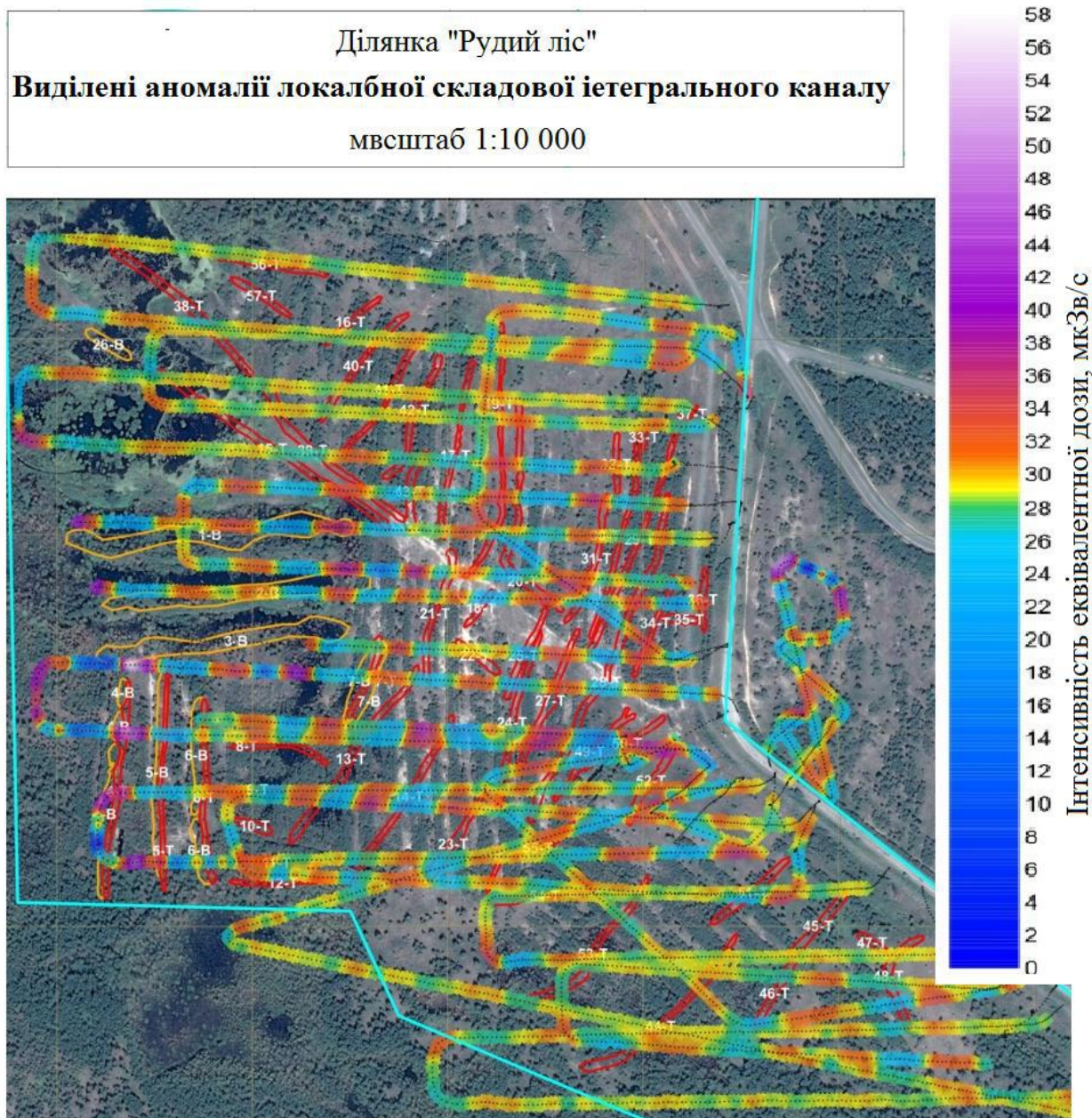


Рис. 4. Схема польотів лабораторної установки над «Рудим Лісом» Чорнобильської зони відчуження

Визначення ймовірності виявлення джерела загоряння проводилося в такому порядку:

1) розраховувалась пошукова продуктивність лабораторної установки як добуток дальності виявлення радіаційного передвісника загоряння на швидкість її польоту;

2) обчислювалось зусилля пошукової системи як відношення добутку пошукової продуктивності на час обстеження району пошуку до добутку площі району на кількість годин у добі;

3) розраховувалась ймовірність виявлення джерела загоряння в районі

пошуку як різниця одиниці і експоненти в негативному ступені, який чисельно рівний зусиллю пошукової системи;

4) визначалася ймовірність виявлення джерела загоряння у всьому контрольованому масиві протягом доби як сума ймовірностей незалежних подій – виявлень джерел загоряння в усіх районах, що складають весь лісовий масив;

5) визначалася ймовірність виявлення джерела загоряння протягом часу вирішення завдання пошуку, наприклад, протягом всього пожежонебезпечного періоду, як сума ймовірностей виявлення джерел загоряння за усі доби, під час яких здійснювався контроль лісового масиву.

Відповідно до отриманих експериментальних даних ймовірність виявлення джерела загоряння протягом першої доби складе 0,1069. При дублюванні графіка на 6-10 добу отримаємо, що ймовірність виявлення джерела загоряння протягом 10 діб вирішення завдання пошуку складе 0,47.

Таким чином, результати натурних експериментів, виконаних з використанням лабораторної установки, а саме польоти над «Рудим Лісом» в Чорнобильській зоні відчуження, не суперечать тезам, сформульованим в математичній моделі запобігання НС, викликаних пожежами радіоактивних лісових масивів, що підтверджує її працездатність та працездатність методики проведення експериментів з використанням розвідувальних безпілотних літальних апаратів.

6. Обговорення результатів перевірки працездатності запропонованої математичної моделі

При розробці математичної моделі запобігання НС, викликаних пожежами радіоактивно-забруднених лісових масивів комплексно використовувалися методи математичного, функціонального і системного аналізу, теорії термодинаміки, дослідження операцій, для оцінки ефективності математичного моделювання, достовірності отриманих результатів та висновків – теорія ймовірностей і математична статистика, методи планування наукових експериментів і обробка їх результатів.

Дані, отримані за допомогою радіаційної зйомки місцевості (рис. 4) дозволили, по розташуванню аномальних контрастів, визначити місце розташування гуртів, в яких були поховані радіоактивні відходи після ліквідації Чорнобильської аварії. На цьому місці був посаджений ліс, який вже виріс і став «рудим». Так встановлено, що особливо на ранніх стадіях загоряння, працює сферичний закон (фронт хвилі розширюється як стінки циліндра, і інтенсивність випромінювання зменшується пропорційно відстані). Це означає, що внаслідок релаксаційних процесів, що відбуваються в атмосфері, відбувається загасання випромінювання на величину, конкретне значення якої залежить від частоти випромінювання і деяких фізичних параметрів приземних шарів атмосфери. Інтенсивність сигналу випромінювання, що поширюється, збільшується на величину, яка визначається спрямованим дією джерела. Коли випромінювання буде поширюватися в півсфері, коефіцієнт концентрації джерела буде дорівнює 2. Аналогічним чином зменшується вплив перешкоди за рахунок спрямованих дій детектора, який визначається коефіцієнтом його концентрації. Безумовно, що аналогічним чином буде виявлятися радіаційна аномалія над лісовим масивом – провісник загоряння, як результат конвективного підйому радіоактивних продуктів горіння.

Процес запобігання НС, викликаних пожежами в радіоактивно-забруднених лісах, з використанням розвідувальних безпілотних літальних апаратів полягає в послідовному виконанні шести процедур, а саме: визначення контрольованого району; організація пошукової системи безпілотних літальних апаратів; розрахунок очікуваних відстаней виявлення бортових пошукових систем; визначення загального часу пошуку і його дискретизація; організація пошуку джерела загоряння і розрахунок ймовірності його виявлення

7. Висновки

Теоретично обґрунтовано математичну модель запобігання надзвичайним ситуаціям, викликаним пожежами радіоактивних лісових масивів. Запропонована математична модель є системою з трьох аналітичних залежностей. Перша з них дозволяє обчислювати ймовірність виявлення радіоактивного передвісника пожежі лісового масиву в залежності від геометричних розмірів контрольованого району лісу, часу пошуку і пошукових зусиль, що прикладаються і визначаються стратегіями пошуку. Друга дозволяє розрахувати значення пошукових зусиль (пошукової продуктивності) в залежності від геометричних розмірів (смуга обстеження, буде дорівнювати $0,7 \cdot D$, а при гарантованому виявленні коефіцієнт (ймовірність) контакту складає $0,8-0,9$) радіоактивної аномалії і дальностей її виявлення основним і додатковим каналами. Третя визначає дальності виявлення радіоактивної аномалії в залежності від швидкості і висоти польоту безпілотних літальних апаратів (максимальна висота підйому літальних апаратів типу лабораторної установки, що пропонується – 15200 м, мінімальна висота польоту, на якій літальний апарат стійко тримається в повітрі і виконує завдання пошуку на надмалих висотах, дорівнює 15 м; швидкість польоту літальних апаратів типу лабораторної установки: максимальна – 900 км/год, мінімальна – 12 км/год).

Працездатність запропонованої математичної моделі запобігання надзвичайним ситуаціям, викликаним пожежами радіоактивних лісових масивів, що перевірена за допомогою лабораторної установки і методики проведення експериментів з її використанням, являється достовірною. Так в результаті натурних експериментів, виконаних з використанням лабораторної установки, а саме польоти над «Рудим Лісом» в Чорнобильській зоні відчуження, встановлено, що: пошукова або крейсерська висота польоту, яка як правило, визначається характером вирішуваних завдань, при пошуку на малих висотах, коли необхідно забезпечити найбільшу ширину перегляду не оптичними каналами, складає від 30 до 300 м; у разі вирішення завдань виносного пункту ретрансляції або панорамного спостереження висота баражування дорівнює 15 км, при цьому значення швидкості встановлюється 150-200 км/год; політ на малих висотах при проведенні розвідувальних або пошукових рятувальних операцій в інтересах забезпечення найбільшої пошукової продуктивності виконується на швидкостях до 200-300 км/год. Відповідно до отриманих експериментальних даних ймовірність виявлення джерела загоряння протягом першої доби складе 0,1069. При дублюванні графіка на 6-10 добу отримуємо, що ймовірність виявлення джерела загоряння протягом 10 діб вирішення завдання пошуку складе 0,47. Простежується яскраво виражена закономірність, що в районах радіоактивно-забрудненого лісового масиву, чим вище радіаційний фон району, тим більше число виявлених загорянь, а також кількість загорянь в лісовому масиві, визначених експериментальною лінійною регресією (висота польоту

Civil Security. DOI: 10.5281/zenodo.4400189

лабораторної установки 50-100 м зі швидкістю 30-60 км/год, політ задається програмою, яка встановлюється в автопілоті лабораторної установки, тривалістю від 40 до 80 хв.), залежить від рівня радіаційного фону, що підтверджує достовірність розробленої математичної моделі запобігання надзвичайним ситуаціям, викликаних пожежами радіоактивних лісових масивів.

Подальші дослідження планується присвятити розробці методики прогнозування надзвичайних ситуацій, викликаних пожежами радіоактивно-забруднених лісів з використанням розвідувальних безпілотних літальних апаратів.

Література

1. Качур Т. В., Тарадуда Д. В., Демент М. О. Прогнозування надзвичайних ситуацій, викликаних пожежами радіоактивно-забруднених лісових масивів // Проблеми надзвичайних ситуацій. 2020. Вип. 31. С. 123–137. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/11278> (дата звернення: 06.10.2020).

2. Badarinath K. V. S., Sharma A. R., Kharol S. K. Forest fire monitoring and burnt area mapping using satellite data: a study over the forest region of Kerala State, India // International Journal of Remote Sensing. 2011. Vol. 32, Issue 1. P. 12–23. doi.org/10.1080/01431160903439890.

3. Evangeliou N. Wildfires in Chernobyl-contaminated forests and risks to the population and the environment: A new nuclear disaster about to happen? // Environment International. 2014. Issue 73. P. 346–358.

4. Zibtsev S. Wildfires Risk Reduction From Forests Contaminated by Radionuclides: A Case Study of the Chernobyl Nuclear Power Plant Exclusion Zone // The 5th International Wildland Fire Conference Sun City, South Africa 9-13 May 2011. P. 39–49. URL: https://static1.squarespace.com/static/5be04d64506fbc3067f96916/t/5be78761758d463fccb986bc/1541900129600/Zibtsev-Oliver-GoldammerWildfire2011_paper.pdf (дата звернення: 01.10.2020).

5. Goldammer J. G., Kashparov V., Zibtsev S. Best practices and recommendations for wildfire suppression in contaminated areas, with focus on radioactive terrain. URL: <http://gfmc.online/globalnetworks/seeurope/OSCE-GFMC-Report-Fire-Management-Contaminated-Terrain-2014-ENG.pdf> (дата звернення: 02.10.2020).

6. The wildfire problem in areas contaminated by the Chernobyl disaster // A. A. Agera and other. Science of The Total Environment. 2019. Vol. 696. P. 5–17. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969719339245> (дата звернення: 01.10.2020).

7. Zibtsev S. V., Goldammer J. G., Robinson S. Fires in nuclear forests: silent threats to the environment and human security // Scholarly Journal. Rome. 2015. Vol. 66.2015/1-2. P. 40–51.

8. Fire evolution in the radioactive forests of Ukraine and Belarus: future risks for the population and the environment // N. Evangeliou and other. Ecological Monographs. 2015, Vol. 85. Issue 1. P. 49-72. URL: <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1890/14-1227.1> (дата звернення: 02.10.2020).

9. Dvornik A. A., Klementeva E.A., Dvornik A. M. Assessment of ¹³⁷Cs contamination of combustion products and air pollution during the forest fires in zones of radioactive contamination // Radioprotection. 2017. Vol. 52(1). P. 29–36.

10. Инженерно-технический метод защиты людей от поражающих факторов

чрезвычайных ситуаций, вызванных загрязнением атмосферы радиоактивными и отравляющими веществами на открытой местности // Е. В. Азаренко та ін. Техногенна-екологічна безпека та цивільний захист. 2017. № 12. С. 5–13.

T. Kachur, PhD, Senior Lecturer of the Department
V. Sobyna, PhD, Associate Professor, Head of Department
D. Taraduda, PhD, Deputy Head of Department
M. Dement, PhD, Associate Professor of the Department
National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

MATHEMATICAL MODEL OF PREVENTION OF EMERGENCIES CAUSED BY FIRE OF RADIOACTIVELY-POLLUTED FORESTS

The mathematical model of prevention of emergencies caused by fires in radioactively contaminated forests is theoretically substantiated. The model is a system of three analytical dependences: the first allows to calculate the probability of detection of a radioactive harbinger of forest fire depending on the geometric dimensions of the controlled forest area, search time and search effort applied and determined by search strategies; the second allows you to calculate the value of search effort (search performance) depending on the geometric dimensions of the radioactive anomaly and the range of its detection by the main and additional channels; the third determines the detection range of a radioactive anomaly depending on the speed and altitude of unmanned aerial vehicles. An experimental verification of the efficiency of the proposed mathematical model with the help of a laboratory setup and methods of conducting experiments with its use. Thus, it is established that especially in the early stages of ignition, the spherical law works: the wave front expands like the walls of a cylinder, and the radiation intensity decreases in proportion to the distance. This means that as a result of relaxation processes occurring in the atmosphere, the attenuation of radiation by a value whose specific value depends on the frequency of radiation and some physical parameters of the surface layers of the atmosphere. Taking into account the results obtained in the work in preventing the development of an emergency caused by a fire in a radioactively contaminated forest allows the emergency response manager to make the right management decisions and ensure safe working conditions for rescuers. Further research is planned to develop a methodology for forecasting emergencies caused by fires in radioactively contaminated forests using reconnaissance unmanned aerial vehicles.

Keywords: emergency, radioactive contamination, emergency prevention, fire, forest, unmanned aerial vehicle, mathematical model

References

1. Kachur, T. V., Taraduda, D. V., Dement, M.O. (2020). Prognozuvannya nadzvy`chajny`x sy`tuacij, vy`kly`kany`x pozhezhamy` radioakty`vno-zabrudneny`x lisovy`x masy`viv. Problemy` nadzvy`chajny`x sy`tuacij, 31, 123–137. Retrieved from <http://repositc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/11278>
2. Badarinath, K. V. S., Sharma, A. R., Kharol, S. K. (2011). Forest fire monitoring and burnt area mapping using satellite data: a study over the forest region of Kerala State, India. *International Journal of Remote Sensing*, 32/1, 12–23. doi.org/10.1080/01431160903439890
3. Evangelidou, N. (2014). Wildfires in Chernobyl-contaminated forests and risks to the population and the environment: A new nuclear disaster about to happen? *Environment International*, 73, 346-358.
4. Zibtsev, S. (2011). Wildfires Risk Reduction From Forests Contaminated by Radionuclides: A Case Study of the Chernobyl Nuclear Power Plant Exclusion Zone. The 5th International Wildland Fire Conference Sun City, South Africa 9-13 May. 39-49. Retrieved from https://static1.squarespace.com/static/5be04d64506f3067f96916/t/5be78761758d463fccb986bc/1541900129600/Zibtsev-Oliver-GoldammerWildfire2011_paper.pdf

5. Goldammer, J. G., Kashparov, V., Zibtsev, S. (2014). Best practices and recommendations for wildfire suppression in contaminated areas, with focus on radioactive terrain. Retrieved from <http://gfmc.online/globalnetworks/seurope/OSCE-GFMC-Report-Fire-Management-Contaminated-Terrain-2014-ENG.pdf>

6. Agera, A. A., Laskob, R., Myroniuk, V., Zibtsev, S., Daye, M. A., Useniak, V., Evers, C. R. (2019). The wildfire problem in areas contaminated by the Chernobyl disaster. *Science of The Total Environment*, 696, 5–17. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969719339245>

7. Zibtsev, S. V., Goldammer, J. G., Robinson, S. (2015). Fires in nuclear forests: silent threats to the environment and human security. *Scholarly Journal*, 66.2015/1-2, 40–51.

8. Evangelidou, N., Balkanski, Y., Cozic, A., Hao, W. M., Mouillot, F., Thonicke, K., Moller, A. P. (2015). Fire evolution in the radioactive forests of Ukraine and Belarus: future risks for the population and the environment. *Ecological Monographs*, 85/1, 49–72. Retrieved from <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1890/14-1227.1>

9. Dvornik, A. A., Klementeva, E. A., Dvornik, A. M. (2017). Assessment of ¹³⁷Cs contamination of combustion products and air pollution during the forest fires in zones of radioactive contamination. *Radioprotection*, 52(1), 29–36.

10. Azarenko, E. V., Borodina, N. A., Goncharenko, Ju. Ju., Divizinjuk, M. M., Zheljak, E. D., Kachur, T. V., Fesaj, A. P. (2017). Inzhenerno-tehnicheskij metod zashhity ljudej ot porazhajushhih faktorov chrezvyčajnyh situacij, vyzvannyh zagryzneniem atmosfery radioaktivnymi i otravljajushhimi veshhestvami na otkrytoj mestnosti. *Tehnogenna-ekologichna bezpeka ta civil'nij zahist*, 12, 5–13.

Надійшла до редколегії: 02.04.2020

Прийнята до друку: 20.04.2020