

УДК 551.463.2 + 621.03.9

Т. В. Качур, к.т.н., ст. викл. каф. (ORCID 0000-0002-1683-956X)
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

ПРОГНОЗУВАННЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ, ВИКЛИКАНИХ ПОЖЕЖАМИ РАДІОАКТИВНО-ЗАБРУДНЕНИХ ЛІСОВИХ МАСИВІВ

Сформульовано та перевірено адекватність концепції виявлення радіаційних передвісників пожеж радіоактивно-забруднених лісових масивів. В результаті проведеного дослідження вирішені наступні завдання: теоретично обґрунтовано підхід до виявлення радіаційних передвісників пожеж радіоактивно-забруднених лісових масивів; перевірено адекватність запропонованого підходу за допомогою лабораторної установки і методики проведення експериментів з її використанням. Серед існуючих в даний час методів і способів прогнозування надзвичайних ситуацій, спровокованих лісовими пожежами можна умовно виділити п'ять напрямків. Проте на сьогодні відсутні методи і способи виявлення передвісників пожеж лісових масивів взагалі і розташованих в зоні радіоактивного забруднення зокрема. Таким чином в Україні існує надзвичайно актуальна на сьогоднішній день наукова проблема – низька ефективність системи раннього виявлення надзвичайних ситуацій, викликаних пожежами в радіоактивно-забруднених лісових масивах України. Її вирішення потребує своєчасного розв'язання низки завдань серед яких – розробка та перевірка адекватності підходу до виявлення радіаційних передвісників пожеж радіоактивно-забруднених лісових масивів. Запропонований підхід визначає якісну відповідність двох факторів, а саме: порога виявлення радіоактивного випромінювання, який визначається чутливістю детектора, і висотою його розміщення над земним покривом, і інтенсивності радіаційних провісників появи пожежі в радіоактивно-забрудненому лісовому масиві (висхідних конвективних потоків з радіоактивними речовинами), що залежить від властивостей горючого матеріалу (його теплоємності і концентрації радіонуклідів), часу його горіння і інтенсивності підпалу. Подальші дослідження плануються присвятити розробці математичної моделі запобігання надзвичайним ситуаціям природного і техногенного характеру, викликаних пожежами радіоактивно-забруднених лісових масивів.

Ключові слова: надзвичайна ситуація, радіоактивне забруднення, прогнозування пожеж, лісовий масив, геоінформаційна система

1. Вступ

Україна є ядерною державою, на території якої розташовано п'ять атомних електростанцій з п'ятнадцятьма діючими ядерними реакторами. Аварії на атомних електростанціях, як правило, супроводжуються викидом в атмосферу радіоактивних речовин і аерозолів, які здатні поширюватися на великі території і вражати все живе на своєму шляху.

Надзвичайні ситуації спровоковані пожежами в радіоактивно-забруднених лісових масивах, крім всіх основних негативних чинників пожеж в лісовому масиві, супроводжується викидом в атмосферу радіоактивних продуктів горіння, які конвективними тепловими потоками піднімаються на значну висоту, а потім розносяться в атмосфері вітром. Вражаючі фактори для населення і територій в цьому випадку аналогічні дії радіоактивного забруднення при ядерних і радіаційних аваріях. Масштаби таких надзвичайних ситуацій ми нещодавно (у квітні-травні) могли спостерігати у лісах Чорнобильської зони.

У зв'язку з вище наведеним, виникає актуальна на сьогоднішній день наукова проблема – низька ефективність системи раннього виявлення надзвичайних ситуацій, викликаних пожежами в радіоактивно-забруднених лісових масивах України.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Для вирішення поставленої наукової проблеми необхідно провести аналіз, формулювання підходу, розробку математичних моделей прогнозування та запобігання надзвичайних ситуацій, викликаних пожежами в радіоактивно-забруднених лісових масивах.

Існуючі методи і способи прогнозування надзвичайних ситуацій, спровокованих лісовими пожежами умовно можна поділити на п'ять основних напрямків вирішення цього завдання.

Перший напрямок – це виявлення пожеж зі спеціальних вишок, які розташовані на височинах, пагорбах та інших природних висотах і дозволяють оглядати прилеглу місцевість. Даний напрямок описано в роботі [1], відповідно до нього спостерігач може візуально виявляти появу диму і вогню – первинних факторів, що свідчать про початок пожежі. Система такого спостереження використовується протягом декількох століть. Головні недоліки даного методу:

- необхідність спорудження висотних наглядових конструкцій;
- залучення відносно великої кількості людей для постійного ведення протипожежного спостереження.

Також схожий підхід описано у роботі [2]. Для візуального виявлення появи диму і вогню система такого спостереження може включати оптичні прилади. Радіус візуального спостереження при хорошій видимості становить близько 30 км. Основним недоліком є залежність дальності спостереження від рельєфу місцевості та прозорості (стану) нижніх шарів атмосфери.

Другий напрямок – це виявлення пожеж за допомогою контролю лісового масиву пожежними патрулями, лісничими, місцевими жителями і відпочиваючими. Даний напрямок реалізований у роботі [3]. Недоліком цього напрямку є той факт, що для його реалізації необхідно залучати велику кількість людей.

У роботі [4] другий напрям розширено завдяки реаліям цифрового віку. В сучасних умовах наявність мобільного зв'язку допомагає своєчасно отримувати інформацію і охоплювати досить великі території. Однак запропоноване удосконалення також має певні недоліки, серед яких основним є залежність точності і своєчасності виявлення пожежі від людського фактору, а контролювати велику кількість людей на значній території досить складно.

Третій напрям – це огляд територій з повітря з використанням пілотованих і безпілотних літальних апаратів (далі БПЛА). Реалізація цього напрямку запропоновано у роботі [5]. Так пропонується, завдяки високій швидкості переміщення літальних апаратів (літаків, вертольотів), за досить нетривалий проміжок часу оглянути велику територію. Тому головна перевага цього напрямку – оперативність. Проте у даного методу існують також певні недоліки, основним з яких є відсутність можливості для літального апарату безперервного огляду території.

Даний напрямок описано також у роботі [6]. В ньому пропонується застосування БПЛА, використання яких безумовно дешевше пілотованих і вимагає набагато менш розгалуженої інфраструктури для їх застосування, наприклад, наявність злітно-посадкової смуги, наземних навігаційних систем забезпечення літаків і вертольотів, аварійно-рятувальних служб забезпечення польотів та інші. Однак ефективний для таких цілей БПЛА коштує дорого, що є суттєвим недоліком даного методу.

Четвертий напрямок – це застосування систем відео моніторингу. Реалізацію даного напрямку запропоновано у роботі [7], відповідно до якої системи, розроблені та застосовані в минулому столітті, являють собою телеустановки в складі

керуваної телекамери, що розміщуються на висотних спорудах, а також пульт управління, розташований безпосередньо поруч з вишкою. Біля кожної вишки знаходиться оператор, який в ручному режимі переглядає територію. Крім безпосередньої відеоінформації, дані системи надають можливість отримання направлення на видимий об'єкт. Таке використання відеоспостереження дозволяє зберегти високі технічні характеристики моніторингу, а саме: радіус огляду з однієї точки – до 30 км, а також отримати три додаткових переваги:

- зниження вимог до висотного спорудження, призначеного для розміщення не людини, а обладнання, робить його значно дешевше і простіше в установці, і тому можна істотно збільшити його висоту;

- поліпшення умов роботи оператора, який знаходиться в приміщенні, розташованому на землі, і не повинен підніматися на висоту для здійснення моніторингу;

- отримання можливості детального розгляду виявленого об'єкта з використанням відеокамери з трансфокатором, що зменшує ймовірність помилкового виявлення за рахунок збільшення точності визначення напрямку на видимий об'єкт і, як наслідок, можливості більш точного виявлення осередків загоряння на відстані до декількох сотень метрів в залежності від віддаленості точки моніторингу.

Головним недоліком цих систем є:

- неможливість визначення координат місця, де сталася пожежа.

- біля кожної вишки повинен чергувати оператор, що знімає і передає дані з камери.

У роботі [8] для реалізації четвертого напрямку пропонується застосування цифрових систем, адже за останнє десятиліття відбувся суттєвий розвиток електроніки та зв'язку. Це призвело до вдосконалення систем відео моніторингу лісових пожеж і масового застосування цифрових керованих камер. Це суттєво вплинуло на зменшення їх вартості при збереженні технічних характеристик. Крім цього, вдосконалення обчислювальної техніки дозволило автоматизувати частину роботи, що виконується людиною, залишивши за нею тільки процес прийняття рішення. Розповсюджене поширення мобільного зв'язку забезпечило масове будівництво висотних споруд як на території великих населених пунктів, так і в сільській місцевості, в тому числі і на територіях, прилеглих до лісових масивів.

П'ятий напрям – визначення місця пожежі з штучних супутників Землі. Для реалізація даного напрямку пропонується застосування методу описаного у роботі [9]. Відповідно до запропонованого методу наявність супутникових даних високої просторової роздільної здатності на основі геоінформаційної системи (ГІС) дозволяє не тільки виявляти пожежі, але прогнозувати їх наслідки. Приймальний комплекс обробляє інформацію з американської супутникової системи NOAA, яка має середню просторову роздільну здатність 1 км і володіє високою оперативністю – зйомка регіону проводиться 4-6 разів на добу. Система супутникового моніторингу лісових пожеж працює в автоматичному режимі, що дозволяє цілодобово протягом пожежонебезпечного періоду вести аналіз, приймання та обробку інформації з метою виявлення осередків полум'я лісових пожеж.

Основними проблемами застосування даної системи є:

- низька точності виявлення осередків пожежі;

- не можливість виявлення різних типів загоряння.

У роботі [10] пропонується вдосконалення п'ятого напрямку шляхом використання даних п'яти каналного радіометра AVHRR в поєднанні з пороговими алго-

ритмами 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. Однак основним недоліком запропонованого апгрейду є необхідність розробки загальної математичної моделі лісових пожеж, яка дозволить удосконалити методику прогнозу лісової пожежної небезпеки.

Таким чином, серед існуючих в даний час методів і способів прогнозування надзвичайних ситуацій, спровокованих лісовими пожежами можна умовно виділити п'ять напрямків. Проте на сьогодні відсутні методи і способи виявлення передвісників пожеж лісових масивів взагалі і розташованих в зоні радіоактивного забруднення зокрема. Саме тому вирішення проблеми низької ефективності системи раннього виявлення надзвичайних ситуацій, викликаних пожежами в радіоактивно-забруднених лісових масивах України потребує своєчасного розв'язання низки завдань серед яких – розробка та перевірка адекватності підходу до виявлення радіаційних передвісників пожеж радіоактивно-забруднених лісових масивів.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є формулювання та перевірка підходу до виявлення радіаційних передвісників пожеж радіоактивно-забруднених лісових масивів.

Досягнення поставленої мети потребує вирішення наступних завдань:

- теоретично обґрунтувати підхід до виявлення радіаційних передвісників пожеж радіоактивно-забруднених лісових масивів;
- перевірити адекватність запропонованого підходу за допомогою лабораторної установки і методики проведення експериментів з її використанням.

4. Теоретичне обґрунтування підходу до виявлення радіаційних передвісників пожеж

Підхід до виявлення радіаційних передвісників пожеж радіоактивно-забруднених лісових масивів представляє собою систему, в якій між параметрами її суб'єктів та реальними об'єктами, які мають однакову фізичну природу, існує однозначна відповідність. В цьому випадку елементам системи ставляться у відповідність фізичні еквіваленти, які відтворюють структуру, основні властивості і співвідношення об'єкта, що досліджується.

При фізичному моделюванні, основою якого є теорія подібності, зберігаються особливості проведення експерименту в натурі з дотриманням оптимального діапазону зміни відповідних фізичних параметрів. У нашому випадку це визначення якісної залежності від параметрів, які описують процес виявлення (або своєчасного виявлення) радіаційних провісників пожеж радіоактивно-забруднених лісових масивів.

У разі постійної інтенсивності джерела іонізуючого випромінювання, чим вище буде чутливість приладу (10...1000 кеВ), тим на більшій відстані він буде виявляти радіоактивний провісник пожежі в радіоактивно-забрудненому лісі. При цьому, якщо чутливість приладу буде зменшуватися, то і джерело випромінювання буде виявлятися на меншому віддаленні.

Розвиток пожежі в радіоактивно-забрудненому лісі складається з п'яти етапів, кожен з яких має свої радіаційні особливості. На першому етапі загоряння або появи джерела вогню, пов'язаного з діяльністю людини або природного явища, радіа-

ційний фон в місці загоряння залишається без змін, як і в усьому лісовому масиві. Слід зазначити, що на радіаційний фон накладає певний відбиток первинне забруднення місцевості, тому чим більше радіоактивних речовин було в ґрунті, тим більше їх було акумульовано деревами. Отже, більша кількість радіонуклідів потрапило в листя, хвою, плоди дерев, які сезонно опадали і створювали радіоактивний покрив. Через велику кількість радіонуклідів, які вбирають дерева, частина гілок у них відмирає і поповнює шар радіоактивного опаду. Частина дерев перетворюється в сухостій. Накопичення цих факторів, з одного боку, сприяє накопиченню радіоактивних речовин і сумарному збільшенню інтенсивності радіації, що фіксується над ураженими лісами, а з іншого – вони сприяють збільшенню шару пального осаду і, відповідно, зростанню пожежного навантаження. Іншими словами, для тих районів радіоактивно-забрудненого лісу, де радіаційний фон перевищує середньостатистичний рівень, можливість виникнення пожеж буде вище в порівнянні з районами, де радіаційний фон нижче середньостатистичного рівня.

На другому етапі, коли відбувається попереднє нагрівання і підсушування горючого матеріалу з виділенням водяного пару, формується перший радіаційний провісник появи пожежі в радіоактивно-забрудненому лісовому масиві. Це підняття радіоактивних парів, утворених при загорянні, над кронами дерев і формування контрастної, в порівнянні з фоном, радіоактивної точкової області – слабкої пульсуючої радіаційної аномалії. Вона утворюється висхідними конвекційними потоками і стійко реєструється на висотах, що перевищують в 2-3 рази висоту дерев (40...60 м). Піднімаючись, радіоактивний пар охолоджується і починає осідати. Теплі потоки, які піднімаються з низу, передають частину свого тепла і також починають осідати. Утворена в результаті цих процесів (пульсуюча) радіаційна аномалія послідовно розширюється, а потім звужується. Інтенсивність її радіоактивності буде визначатися властивостями горючого матеріалу, концентрацією радіоактивних речовин в його складі, а також часом горіння, які визначають існування конвекційних потоків (час виявлення не перевищує 5 діб, тобто діапазон варіювання 1...120 год.). На формування такої аномалії буде впливати також характер (інтенсивність) підпалу (статистика ландшафтних пожеж показує, що середня площа підпалу коливається в діапазоні 1...50 м²). Так тліюча сигарета за наявності оптимальних умов запалює стружки й деревину через 1-1,5 та 2-3 год. (полум'я з'являється, коли температура досягає 450–500 °С); паперові відходи, сіно, солому – через 0,25-1 год. (залежно від їх щільності); бавовняні тканини – через 0,5-1 год. (залежно від об'ємної маси тканини). Іскра діаметром 2 мм пожежонебезпечна, якщо має температуру близько 1000 °С, діаметром 3 мм – 800 °С, діаметром 5 мм – 600 °С. Іскри середніх розмірів 3,5 мм охолоджуються до пожежобезпечного стану протягом 5 с.

На третьому етапі, коли відбувається висихання горючого матеріалу і його горіння з виділенням горючих речовин, формується другий радіаційний провісник появи пожежі в радіоактивно-забрудненому лісовому масиві. При цьому утворюється стійка радіоактивна аномалія, що контрастно виділяється на радіоактивному фоні лісу, і переростає з радіоактивної точкової області в слабо пульсуючу радіаційну аномалію. Оскільки її поява зумовлена розширенням конвективних висхідних потоків, то геометричні розміри такої аномалії в кілька разів перевищують площу ґрунтового покриття, на якому розвивається процес горіння. Для цієї аномалії характерно утворення ядра, розташованого в центрі конвективного висхідного потоку, і периферії, яку формують охолонуті радіоактивні пари і го-

рючі радіоактивні гази. Інтенсивність радіоактивного випромінювання аномальної області в цьому випадку також буде визначатися параметрами горючого матеріалу, перш за все його теплоємністю ($1,7 \dots 1,9$ кДж/кг·К), і концентрацією радіоактивних речовин (наприклад ^{137}Cs від 700 до 3000 Бк/кг).

Інтенсивність радіоактивності аномалії також буде залежати від часу і інтенсивності (швидкості) горіння горючого матеріалу, які визначають характеристики конвекційних потоків. На формування і цієї аномалії буде впливати характер (інтенсивність) підпалу. Чим на більшій площі одночасно виникнуть загоряння, тим інтенсивніше розвиватиметься пожежа і охоплюватиме велику площу.

На четвертому етапі розвитку лісової пожежі, коли відбувається займання газів, формується третій радіаційний провісник появи пожежі в радіоактивно-забрудненому лісовому масиві. Відбувається переформування стійкої радіоактивної аномалії в об'ємну радіоактивну аномалію, в якій радіоактивність значно збільшується в міру наближення від периферії до центру. На її периферії з'являються локальні радіоактивні шлейфи, обумовлені рухом повітряних мас в приземних шарах атмосфери і нерівномірністю руху повітряних потоків, що утворюються при цьому. Інтенсивність радіоактивного випромінювання об'ємної аномалії зростає, що викликано збільшенням температури горіння, зростанням інтенсивності горіння і, отже, виділенням більшого обсягу радіоактивних речовин, що піднімаються конвективними потоками вгору. У цьому випадку інтенсивність радіоактивного випромінювання об'ємної аномалії визначається параметрами горючого матеріалу, часом горіння і інтенсивністю підпалу.

На п'ятому етапі розвитку лісової пожежі, коли починається полум'яне горіння з виділенням диму, вуглекислого газу, водяного пару і незгорілих газів, формується четвертий радіаційний провісник появи пожежі в радіоактивно-забрудненому лісовому масиві. Відбувається розвиток (трансформація) об'ємної радіоактивної аномалії, поява в її структурі декількох епіцентрів – вогнищ найбільшої радіоактивності, і додаткових радіоактивних шлейфів, що викликає значні зростання радіоактивності аномалії. Така трансформація обумовлена розширенням пожежі, зростанням температури і інтенсивності горіння, утворенням декількох висхідних конвекційних потоків. Рух повітряних мас формує радіоактивні шлейфи. Як і на попередніх етапах процесу, що відбуваються, визначаються властивостями горючого матеріалу, часом горіння і характером підпалу.

Отже, інтенсивність радіаційних провісників появи пожежі в радіоактивно-забрудненому лісовому масиві визначається трьома параметрами:

1) властивості горючого матеріалу: чим більше його теплоємність, тим більша кількість тепла буде виділятися за одиницю часу при його горінні і, отже, більшу кількість радіоактивних речовин за одиницю часу підніметься вгору, при цьому чим більше концентрація радіонуклідів в пальному матеріалі, тим більша їх кількість за одиницю часу виявиться в радіаційних провісниках;

2) час горіння – інтегральна характеристика: чим більший час горить радіоактивний пальний матеріал, тим більша кількість радіоактивних речовин виявиться в конвекційних висхідних потоках;

3) інтенсивність підпалу: чим на більшій площі одночасно виникнуть загоряння, тим інтенсивніше розвиватиметься пожежа і охоплюватиме більшу площу.

Таким чином, підхід до виявлення радіаційних провісників пожеж радіоактивно-забруднених лісових масивів визначає якісну відповідність двох факторів, а саме: порога виявлення радіоактивного випромінювання, який визначається чут-

лівістю детектора (10...1000 кеВ), і висотою його розміщення над земним покриттям (50...100 м), і інтенсивності радіаційних провісників появи пожежі в радіоактивно-забрудненому лісовому масиві (всхідних конвективних потоків з радіоактивними речовинами), що залежить від властивостей горючого матеріалу (його теплоємності (1,7...1,9 кДж/кг·К)) і концентрації радіонуклідів (наприклад ^{137}Cs від 700 до 3000 Бк/кг), часу його горіння (час виявлення не перевищує 5 діб, тобто діапазон варіювання 1...120 год.) і інтенсивності підпалу (статистика ландшафтних пожеж показує, що середня площа підпалу коливається в діапазоні 1...50 м² при температурі іскри 400...1000 °С).

5. Перевірка адекватності запропонованого підходу

Для перевірки достовірності запропонованого підходу до виявлення радіаційних провісників пожеж радіоактивних лісових масивів [12-13] розроблено лабораторну установку, методику і етапи проведення відповідних експериментів на ній.

Лабораторна установка розроблена на базі геоінформаційної системи зони відчуження і прилеглих до неї територій з використанням пакетів програмного забезпечення Arc GIS-10.1 и Map Info. Наявність цифрової карти місцевості, на якій розташовується лісовий масив, підданий в 1986 році радіаційному забрудненню, дозволяє виробляти його детальний аналіз і картографічне районування по одному або декільком заданим критеріям. Зазначене вище програмне забезпечення дозволяє використовувати статистичні дані, а також і бази даних, безпосередньо не пов'язані з ГІС, і використовувати їх для моделювання різних сценаріїв розвитку процесів і подій на цифровій карті місцевості.

Для цього використовувалися дані вимірювань радіаційного фону в зоні відчуження, на прилеглих до неї територіях, а також вимірювання радіаційного фону лісових масивів, накопичені за останні 30 років. Крім того, використовувалися дані про спалахи в лісових масивах, схильних до радіоактивного забруднення, за 2017, 2018 і 2019 роки від пожежно-рятувальних частин, які обслуговують Чорнобильську зону.

Методика проведення експериментів з використанням лабораторної установки передбачає виконання наступного порядку дій.

1. Визначення зони контрольованого лісового масиву, підданого радіоактивному забрудненню.

2. Районування контрольованого лісового масиву з радіаційного та пошукового критеріїв. Перший – радіаційний критерій, передбачає, що в межах району радіаційний фон змінюється не більше, ніж на десять одиниць. Другий – пошуковий критерій, передбачає, що район повинен бути досить великим, щоб його обстеження з використанням БПЛА займало не менше двох годин польотного часу. У той же час його розміри не повинні перевищувати розмірів, які міг би обстежити БПЛА за один виліт.

3. Систематизація даних загорянь по районам і рокам контрольованого лісового масиву, підданого радіоактивному забрудненню.

4. Побудова гістограми числа загорянь в районах залежно від рівня радіаційного фону.

5. Перевірка центральної гіпотези експерименту.

Розглянемо експеримент, проведений на лабораторній установці, відповідно до хронології його виконання.

1. Контрольований лісовий масив, підданий радіоактивному забрудненню був визначений як ліс, розташований в тридцятикілометровій зоні відчуження і на

прилеглих до нього територіях, де реєструвалися загоряння за останні 4 роки, починаючи з 2016 року.

2. Обраний контрольований лісовий масив був розділений на 16 пошукових районів, площі яких істотно відрізнялися один від одного, але задовольняли вимогам, викладеним в [13].

Серед них (рис. 1) один район з радіаційним фоном 20 одиниць – 1.4; два райони 1.3 і 4.4 з радіаційним фоном 30 одиниць; п'ять районів – 1.1, 1.2, 2.3, 3.4 і 4.3 з радіаційним фоном 40 одиниць; три райони 2.1, 2.4, і 3.2 з радіаційним фоном 50 одиниць; два району 3.3 і 4.1 з радіаційним фоном 60 одиниць; два району 2.2 і 4.2 з радіаційним фоном 70 одиниць; один район 3.1 з радіаційним фоном 90 одиниць. Розподіл районів за ступенем радіоактивного забруднення представлено в табл. 1.

	1	2	3	4
1	1.1 40	1.2 40	1.3 30	1.4 20
2	2.1 50	2.2 70	2.3 40	2.4 50
3	3.1 90	3.2 50	3.3 60	3.4 40
4	4.1 60	4.2 70	4.3 40	4.4 30

Рис. 1. Схема районів

3. В результаті систематизації даних загорянь по районах і роках контрольованого лісового масиву, підданого радіоактивному забрудненню, отримані наступні результати.

Табл. 1. Розподіл районів за ступенем радіоактивного забруднення

Радіаційний фон (од.)	Кількість районів	Номери районів
20	1	1.4
30	2	1.3; 4.4
40	5	1.1; 1.2; 2.3; 3.4; 4.3
50	3	2.1; 2.4; 3.2
60	2	3.3; 4.1
70	2	2.2; 4.2
80	-	-
90	1	3.1

За 2017 рік у районі 2.1 зафіксовано три загоряння, в районі 2.2 – два, в районі 2.4 – одне, в районі 3.1 – шість, в районі 3.2 – чотири, в районі 4.1 – чотири, в районі 4.2 – два і в районі 4.4 – одне. Всього в 2017 році в контрольованому лісовому масиві було зареєстровано 23 пожежі.

За 2018 рік у районі 1.3 зафіксовано одне загоряння, в районі 2.2 – чотири, в районі 3.1 – п'ять загорянь, в районі 3.3 – два загоряння, в районі 4.1 – сім загорянь і в районі 4.2 – три загоряння. Всього у 2018 році в контрольованому лісовому масиві було зареєстровано 22 пожежі.

За 2019 рік у районі 2.1 зафіксовано чотири пожежі, в районі 2.3 – одне загоряння, в районі 2.4 – два загоряння, в районі 3.1 – сім загорянь, в районі 3.2 – п'ять загорянь, в районі 4.1 – два загоряння і в районі 4.2 – чотири загоряння. Всього в 2019 році в контрольованому лісовому масиві було зареєстровано 25 спалахів. Результати систематизації представлені на схемі рис. 2.

<u>2017</u>	<u>2018</u>	<u>2019</u>																																																
<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td>3</td><td>2</td><td> </td><td>1</td></tr> <tr><td>6</td><td>4</td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td>4</td><td>2</td><td> </td><td>1</td></tr> </table>					3	2		1	6	4			4	2		1	<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr><td> </td><td> </td><td>1</td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td>4</td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td>5</td><td> </td><td>2</td><td> </td></tr> <tr><td>7</td><td>3</td><td> </td><td> </td></tr> </table>			1			4			5		2		7	3			<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td>4</td><td> </td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>7</td><td>5</td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td>2</td><td>4</td><td> </td><td> </td></tr> </table>					4		1	2	7	5			2	4		
3	2		1																																															
6	4																																																	
4	2		1																																															
		1																																																
	4																																																	
5		2																																																
7	3																																																	
4		1	2																																															
7	5																																																	
2	4																																																	
<u>23</u>	<u>22</u>	<u>25</u>																																																

Рис. 2. Результати систематизації загорянь по роках і районах

За три роки в районах контрольованого лісового масиву було зареєстровано 70 спалахів. По районах вони розподілилися наступним чином. У районах 1.1, 1.2, 2.3, 4.3, 4.3 (з радіаційним фоном 40 одиниць) і в районі 1.4 (з радіаційним фоном 20 одиниць) загорянь не було зареєстровано. Результати підсумкової систематизації представлені на схемі рис. 3.

	1	2	3	4
1	1.1 40	1.2 40	1.3 1 30	1.4 20
2	2.1 7 50	2.2 6 70	2.3 1 40	2.4 3 50
3	3.1 18 90	3.2 9 50	3.3 2 60	3.4 40
4	4.1 13 60	4.2 9 70	4.3 40	4.4 1 30

Рис. 3. Результати підсумкової систематизації

4. Побудова гістограми, що відображає залежність числа загорянь в районі від рівня його радіаційного фону. Для цього систематизуємо наступні дані. У районах з радіаційним фоном 20 і 80 одиниць загорянь не зафіксовано. У районах з радіаційним фоном 30 одиниць було зафіксовано два загоряння або 0,66 загорянь на рік. У районах з радіаційним фоном 40 одиниць було зафіксовано одне загоряння або 0,33 загоряння в рік. У районах з радіаційним фоном 50 одиниць було зафіксовано дев'ятнадцять загорянь або 6,33 загоряння в рік. У районах з радіаційним фоном 60 одиниць було зафіксовано п'ятнадцять загорянь або 5 загорянь на рік. У районах з радіаційним фоном 70 одиниць було зафіксовано п'ятнадцять загорянь або 5 загорянь на рік. У районах з радіаційним фоном 90 одиниць було зафіксовано вісімнадцять або 6 загорянь на рік. Розподіл кількості загорянь в досліджуваних районах по роках представлені в табл. 2, узагальнені ж відомості про кількість загорянь в залежності від рівня радіаційного фону показані в табл. 3.

Табл. 2. Розподіл кількості загорянь в досліджуваних районах по роках

Радіаційний фон (од.)	Номер району	Кількість загорянь на рік			Всього
		2017	2018	2019	
20	1.4				
30	1.3		1		1
	4.4	1			1
40	1.1				
	1.2				
	2.3			1	1
	3.4				
	4.3				
50	2.1	3		4	7
	2.4	1		2	3
	3.2	4		5	9
60	3.3		2		2
	4.1	4	7	2	13
70	2.2	2	4		6
	4.2	2	3	4	9
80	-				
90	3.1	6	5	7	18
Всього		23	22	25	70

Табл. 3. Узагальнені відомості про кількість загорянь в залежності від рівня радіаційного фону

Радіаційний фон (од.)	Кількість загорянь на рік (од.)	Кількість загорянь на рік (відносні од.)
20	-	-
30	2	0,66
40	1	0,33
50	19	6,33
60	15	5
70	15	5
80	-	-
90	18	6

Побудована за цими даними гістограма представлена на рис. 4.

5. Побудована лінійна регресія підтверджує гіпотезу, що кількість загорянь в лісовому масиві залежить від рівня радіаційного фону.

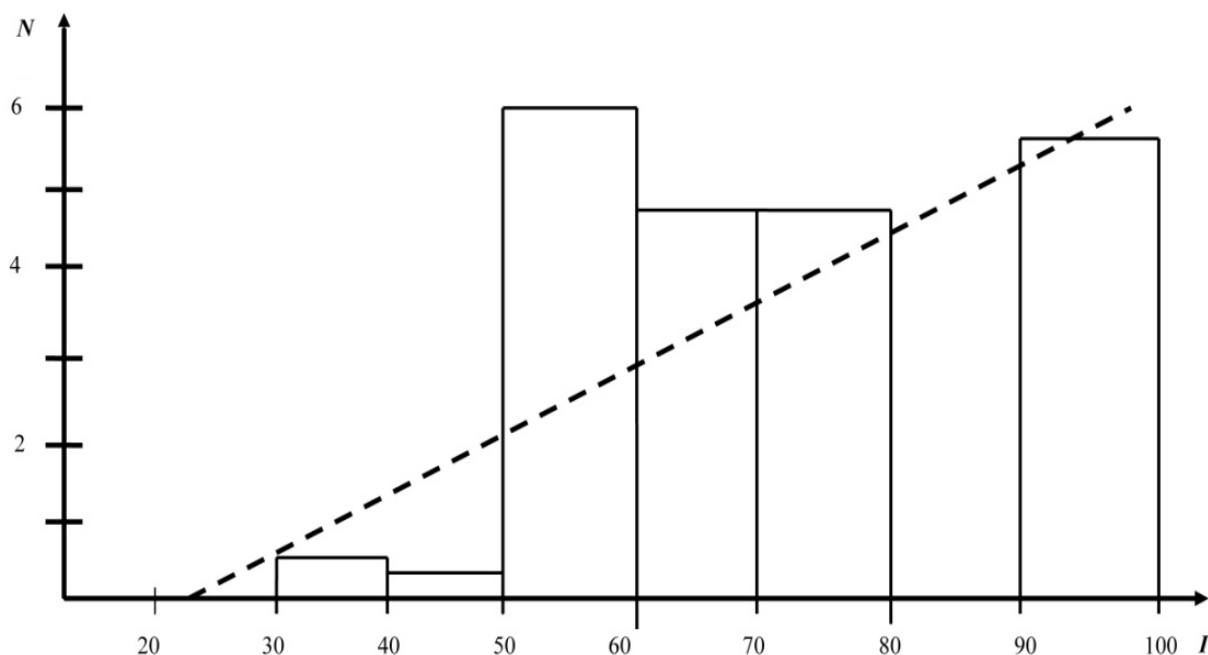


Рис. 4. Гістограма частоти загорянь (N – кількість загорянь, I – радіаційний фон)

Виходячи із вище викладеного головна ідеєю запобігання надзвичайним ситуаціям, викликаних пожежею радіоактивно-забрудненого лісового масиву, полягатиме в тому, щоб своєчасно виявити джерело загоряння шляхом виявлення радіаційних провісників за допомогою безпілотних літальних апаратів. З цієї точки зору на основі запропонованого підходу потрібно розробити математичну модель, що описує процеси, які відбуваються при цьому, вона повинна забезпечити розрахунок ефективності пошуку з використанням безпілотних літальних апаратів, оснащених відповідною апаратурою. Звідси одним з головних критеріїв оцінки ефективності пошуку буде ймовірність виявлення об'єкта пошуку.

Також було б доцільно порівняти даний метод пошуку із уже відомими, а саме, пошук за допомогою супутників, мобільних наземних систем моніторингу та отримані дані проаналізувати до відповідних критеріїв (фінансові, матеріальні, людські та часові витрати).

6. Обговорення результатів перевірки адекватності запропонованого підходу

Розглянуті основні етапи розвитку лісових пожеж, характерних для радіоактивно забруднених лісових масивів України.

В результаті аналізу систематизації даних загорянь по районах і роках контрольованого лісового масиву, підданого радіоактивному забрудненню (рис. 3) встановлено, що в районі 1.3 (з радіаційним фоном 30 одиниць) було зафіксовано 1 загоряння, в районі 2.1 (з радіаційним фоном 50 одиниць) – 7 загорянь, в районі 2.2 (з радіаційним фоном 70 одиниць) – 6 спалахів, в районі 2.3 (з радіаційним фоном 40 одиниць) – 1 загоряння, в районі 2.4 (з радіаційним фоном 50 одиниць) – 3 загоряння, в районі 3.1 (з радіаційним фоном 90 одиниць) – 18 загорянь, в районі 3.2 (з радіаційним фоном 50 одиниць) – 9 загорянь, в районі 3.3 (з радіаційним фоном 60 одиниць) – 2 загоряння, в районі 4.1 (з радіаційним фоном 60 одиниць) – 13 загорянь, в районі 4.2 (з радіаційним фоном 70 одиниць) – 9 загорянь, в районі 4.4 (з радіаційним фоном 30 одиниць) – 1 загоряння. Очевидно, простежу-

ється яскраво виражена закономірність, що в районах лісового масиву, що піддаюся радіоактивному забрудненню, чим вище радіаційний фон району (20...90 одиниць), тим більше число виявлених загорянь (0...19 загорянь за рік) (табл. 2).

Крім цього, особливість загорянь радіоактивно-забруднених лісів полягає в наявності радіаційних провісників виникнення і розвитку лісової пожежі: 1) підняття радіоактивних парів, утворених при загорянні, і формування контрастного, в порівнянні із загальним фоном, радіоактивного сліду – слабкої пульсуючої радіаційної аномалії; 2) утворення стійкої радіоактивної аномалії, що контрастно виділяється на радіоактивному фоні лісу; 3) формування об'ємної радіоактивної аномалії, в якій радіоактивність значно збільшується в міру наближення від периферії до центру, а також поява локальних радіоактивних шлейфів, обумовлених нерівномірністю розподілу повітряних потоків; 4) поява в структурі об'ємної радіоактивної аномалії декількох епіцентрів – вогнищ найбільшої радіоактивності, додаткових радіоактивних шлейфів і значне зростання радіоактивності аномалії.

7. Висновки

1. Теоретично обґрунтовано підхід до виявлення радіаційних передвісників пожеж радіоактивно-забруднених лісових масивів. Запропонований підхід визначає якісну відповідність двох факторів, а саме: 1) порога виявлення радіоактивного випромінювання, який визначається чутливістю детектора (10...1000 кеВ), і висотою його розміщення над земним покривом (50...100 м); 2) інтенсивності радіаційних провісників появи пожежі в радіоактивно-забрудненому лісовому масиві. Інтенсивність радіаційних провісників появи пожежі в радіоактивно-забрудненому лісовому масиві визначається 3 параметрами: 1) властивості горючого матеріалу: чим більше його теплоємність (1,7...1,9 кДж/кг·К), тим більша кількість тепла буде виділятися за одиницю часу при його горінні і, отже, більшу кількість радіоактивних речовин за одиницю часу підніметься вгору, при цьому чим більше концентрація радіонуклідів в пальному матеріалі (наприклад ^{137}Cs від 700 до 3000 Бк/кг), тим більша їх кількість за одиницю часу виявиться в радіаційних провісниках; 2) час горіння – інтегральна характеристика: чим більший час горить радіоактивний паливий матеріал (час виявлення не перевищує 5 діб, тобто діапазон варіювання 1...120 год.), тим більша кількість радіоактивних речовин виявиться в конвекційних висхідних потоках; 3) інтенсивність підпалу: чим на більшій площі одночасно виникнуть загоряння (статистика ландшафтних пожеж показує, що середня площа підпалу коливається в діапазоні 1...50 м² при температурі іскри 400...1000 °С), тим інтенсивніше розвиватиметься пожежа і охоплюватиме більшу площу.

2. Адекватність запропонованого підходу до виявлення радіаційних передвісників пожеж радіоактивно-забруднених лісових масивів за допомогою лабораторної установки і методики проведення експериментів з її використанням являється достовірною. Створена лабораторна установка на базі геоінформаційної системи з використанням пакетів програмного забезпечення Arc GIS-10.1 і Map Info, а також розроблена методика проведення експериментів з її використанням дозволяють проведення численних експериментів. Методика проведення експерименту передбачає ряд обмежень: 1) в межах району радіаційний фон змінюється не більше, ніж на 10 одиниць; 2) район повинен бути досить великим, щоб його обстеження з використанням БПЛА займало не менше 2 годин польотного часу; 3) у той же час розміри району обстеження не повинні перевищувати розмірів, які міг би обстежити

БПЛА за 1 виліт. В якості території для дослідження було обрано ділянку, розташовану в 30 кілометровій зоні відчуження і прилеглих до неї територій, де реєструвалися загоряння за останні 4 роки, починаючи з 2016 року. Обраний контрольований лісовий масив був розділений на 16 пошукових районів. В результаті проведення експериментів встановлено: по-перше, яскраво виражену закономірність, що в районах радіоактивно-забрудненого лісового масиву, чим вище радіаційний фон району, тим більше число виявлених загорянь; по-друге, кількість загорянь в лісовому масиві, визначених експериментальною лінійною регресією, залежить від рівня радіаційного фону в радіоактивно-забруднених лісових масивах. Так встановлено, що в діапазоні активності радіаційного фону 0...90 одиниць кількість загорянь спостерігається в інтервалі 0...19 одиниць за рік.

Подальші дослідження планується присвятити розробці математичної моделі запобігання надзвичайним ситуаціям природного і техногенного характеру, викликаних пожежами радіоактивно-забруднених лісових масивів.

Література

1. Прокопьев К. О., Копылова С. Г. Основные причины возникновения лесных пожаров и борьба с ними // Юный ученый. 2017. № 1.1 (10.1). С. 60–61.
2. Кочкар Д. А., Мединцев С. Ю., Орехов А. А. Оптимальное размещение вышек наблюдений наземных систем видеомониторинга лесных пожаров // Радиоэлектронные технологии. Харьков. 2010. № 7 (48). С. 311–314.
3. Шишалов И. С. Обнаружение лесных пожаров: основные этапы развития. Доступ: <http://www.cesutesk.ru/articles2/фйресес/обнаружение-лесных-пожаров-основные-этапы-развития>
4. Катковский, Л. В. Применение авиационной системы контроля ЧС для оценки пожарной опасности лесов, обнаружения пожаров и оценки их последствий Доклады БГУИР. 2010. № 6 (52). С. 5–13.
5. Способы обнаружения и тушения природных пожаров. Доступ: <https://ria.ru/nsk/20131111/975853092.html>
6. Никулин О. Ф., Багров О. С. Применение беспилотных летальных аппаратов с синфазной антенной решеткой для системы мониторинга пожаров // Вестник АМУ. Серия «Техника». 2014. Вып. 1 (7). С. 113–127.
7. Бабий С. М., Кочкар Д. А., Чмовж В. В. Алгоритм покрытий площади лесного массива кругов видеонаблюдения и контроля // Радиоэлектронные и компьютерные системы. Харьков, 2010. № 7 (48). С. 272–277.
8. Новая система пожарного мониторинга. Доступ: <http://inform.nstu.ru/print.phpid=564>
9. Лупян Е. А., Барталев С. А., Балашов И. В., Егоров В. А., Ершов Д. В., Кобец Д. А., Сенько К. С., Стыщенко Ф. В., Сычугов И. Г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 158–175.
10. Сизиков А. С. Хвалец С. В. Современные тенденции развития аэрокосмического мониторинга чрезвычайных ситуаций // Чрезвычайные ситуации: теория, практика, инновации-2012: Тез. докл. междунар. научно-практич. конф. Гомель, 24–25 мая 2012. Ч. 1. С. 115–116.
11. Андрианов Н. Г., Лагуткин В. Н., Лукьянов А. П. и др. Сеть малых космических аппаратов для оперативного обнаружения пожаров // Успехи совр. радиоэлектрон. 2011. № 8. С. 42–49.
12. Азаренко Е. В., Дивизинюк М. М., Забулонов Ю. Л., Качур Т. В., Фараццивіл security. DOI: 10.5281/zenodo.3901969

хов А. В. Методика прогнозирования чрезвычайных ситуаций, вызванных пожарами лесов Украины, подвергнутых радиоактивному загрязнению, с использованием разведывательных беспилотных летательных аппаратов // Збірник наукових праць. Техногенно-екологічна безпека та цивільний захист. Київ: ДУ «ІГНС НАН України». 2018. Вип. 11 (1). С. 12–17.

13. Азаренко Е. В., Дивизинюк М. М., Смирнов Ю. А., Забулонов Л., Качур Т. В., Фаррахов А. В. Проверка подлинности разработанных моделей и предлагаемой методики прогнозирования чрезвычайных ситуаций с использованием разведывательных беспилотных летательных аппаратов // Сборник научных исследований. Техногенно-экологическая безопасность та гражданская защита. Киев: ДУ «ІГНС НАН України». 2018. Вып. 12 (2). С. 5–12.

T. Kachur, PhD, Senior Lecturer of the 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

FORECASTING OF EMERGENCY CAUSED BY FIRE OF RADIOACTIVELY CONTAMINATED FOREST ARRAYS

The adequacy of the concept of detection of radiation precursors of fires of radioactively contaminated forests has been formulated and tested. As a result of the research the following tasks were solved: the approach to detection of radiation precursors of fires of radioactively contaminated forests is theoretically substantiated; the adequacy of the proposed approach with the help of a laboratory installation and methods of conducting experiments with its use was checked. Among the currently existing methods and ways of predicting emergencies provoked by forest fires can be divided into five areas. However, today there are no methods and ways to detect the precursors of forest fires in general and located in the area of radioactive contamination in particular. Thus, in Ukraine there is an extremely relevant scientific problem today - the low efficiency of the system of early detection of emergencies caused by fires in radioactively contaminated forests of Ukraine. Its solution requires the timely solution of a number of tasks, including the development and verification of the adequacy of the approach to the detection of radiation precursors of fires in radioactively contaminated forests. The proposed approach determines the qualitative correspondence of two factors, namely: the detection threshold of radioactive radiation, which is determined by the sensitivity of the detector and the height of its location above the ground, and the intensity of radiation predictors of fire in radioactively contaminated forest (ascending convective fluxes which depends on the properties of the combustible material (its heat capacity and concentration of radionuclides), its burning time and intensity of ignition. Further research is planned to develop a mathematical model for the prevention of natural and man-made emergencies caused by fires in radioactively contaminated forests.

Keywords: emergency, radioactive contamination, fire forecasting, forest array, geoinformation system

References

1. Prokopen, K. O. Prokopen, K. O., Kopylova, S. G. (2017). Osnovnyie prichinyi vozniknoveniya lesnyih pozharov i borba s nimi. Yunyiy ucheniy, 1 (10.1), 60–61.
2. Kochkar, D. A., Medincev, S. Yu., Orehov, A. A. Optimalnoe razmeshenie vyshek nablyudeniya nazemnyh sistem video-monitoringa lesnyh pozharov. Radioelektronniy komp'yuternisistemi. Harkiv, 2010, 7 (48), 311–314.
3. Shishalov, I. S. Obnaruzhenie lesnyh pozharov: osnovnye etapy razvitiya. Dostup: <http://www.secuteck.ru/articles2/firesec/obnaryjenie-lesnih-pojarov-osnovnie-etapi-razvitiya>
4. Katkovskiy, L. V. Primenenie aviatsionnoy sistemyi kontrolya ChS dlya otsenki pozharoy opasnosti lesov, obnaruzheniya pozharov i otsenki ih posledstviy. Doklady BGUIR, 2010, 6 (52), 5–13.

5. Sposoby obnaruzheniya i tusheniya prirodnyh pozharov. URL: <https://ria.ru/nsk/20131111/975853092.html>

6. Nikulin, O. F., Bagrov O. S. Primenenie bespilotnyh letatelnyh apparatov s sinfaznoj antennoj reshetkoj dlya sistem monitoringa pozharov. Visnik AMU. Seriya «Tehnika», 2014, 1 (7), 113–127.

7. Babij, S. M., Kochkar, D. A., Chmovzh V. V. Algoritm pokrytiya ploshadi lesnogo massiva krugami videonablyudeniya i kontrolya. Radioelektronni i komp'yuternisistemi. Harkiv, 2010, 7 (48), 272–277.

8. Novaya sistema pozharnogo monitoringa. URL: <http://inform.nstu.ru/print.phpid=564>

9. Lupyan, E. A., Bartalev, S. A., Balashov, I. V., Egorov, V. A., Ershov, D. V., Kobets, D. A., Senko, K. S., Styitsenko, F. V., Syichugov, I. G. Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 2017, 14, 6, 158–175.

10. Sizikov, A. S., Hvalej S. V. Sovremennyye tendentsii razvitiya aerokosmicheskogo monitoringa chrezvyichaynyh situatsiy. Chrezvyichaynyie situatsii: teoriya, praktika, innovatsii-2012: Tez. dokl. mezhdunar. nauchno-praktich. konf. Gomel, 24–25 maya 2012, 1, 115–116.

11. Andrianov, N. G. Lagutkin, V. N., Lukyanov, A. P. i dr. Set malyh kosmicheskikh apparatov dlya operativnogo obnaruzheniya pozharov. Uspehi sovr. radioelektron, 2011, 8, 42–49.

12. Azarenko, E. V., Divizinyuk, M. M., Zabulonov, Yu. L., Kachur, T. V., Farrahov A. V. Metodika prognozirovaniya chrezvyhajnyh situacij, vyzvannyh pozhami lesov Ukrainy, podvergnutyhradioaktivnomu zagryazneniyu, s ispolzovaniem razvedyvatelnyh bespilotnyh letatelnyh apparatov. Zbirnik naukovih prac «Tehnogenna-ekologichna bezpeka ta civilnij zahist». Kiyiv: DU «IGNS NAN Ukrayini», 2018, 11 (1), 12–17.

13. Azarenko, E. V., Divizinyuk, M. M., Zabulonov, Yu. L., Kachur, T. V., Farrahov, A. V. Proverka dostovernosti razrobotannyh modelej i predlozhennoj metodiki prognozirovaniya chrezvyhajnyh situacij s ispolzovaniem razvedyvatelnyh bespilotnyh letatelnyh apparatov. Zbirnik naukovih prac «Tehnogenna-ekologichna bezpeka ta civilnij zahist». Kiyiv: DU «IGNS NAN Ukrayini», 2018, 12 (2). 5–12.

Надійшла до редколегії: 11.02.2020

Прийнята до друку: 20.02.2020