

Т. В. Качур, М. М. Дівізінюк, О. В. Азаренко,
В. О. Собина, Д. В. Тарадуда

**ПРОГНОЗУВАННЯ НАДЗВИЧАЙНИХ
СИТУАЦІЙ, ЯКІ ВИКЛИКАНІ ПОЖЕЖАМИ,
В РАДІОАКТИВНО-ЗАБРУДНЕНИХ
ЛІСОВИХ МАСИВАХ УКРАЇНИ
З ВИКОРИСТАННЯМ РОЗВІДУВАЛЬНИХ
БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ**

Друкується за рішенням
вченої ради НУЦЗ України
(протокол № 4 від 17.12.2020 р.)

Харків
2020

Качур Т.В. Прогнозування надзвичайних ситуацій, які викликані пожежами, в радіоактивно-забруднених лісових масивах України з використанням розвідувальних безпілотних літальних апаратів: монографія / Т. В. Качур, М. М. Дівізінюк, О. В. Азаренко, В. О. Собина, Д. В. Тарадуда – Харків: НУЦЗ України, 2020. – 96 с.

Монографія присвячена вирішенню важливого наукового завдання в галузі цивільного захисту – прогнозування надзвичайних ситуацій, викликаних пожежами радіоактивно-забруднених лісів України, з використанням розвідувальних безпілотних літальних апаратів.

У монографії проведено аналіз літературних та інформаційних джерел, на підставі якого визначено, що радіоактивне забруднення територій призводить до накопичення радіоактивних речовин різними видами флори і фауни, особливо лісовими масивами, які потрапили в зону радіоактивних викидів, пожежі в яких є одним із джерел забруднення атмосфери радіоактивними речовинами. Розглянуто основні етапи розвитку лісових пожеж, характерних для лісових масивів різних регіонів України, в горах і на рівнинах. Розроблено математичну модель запобігання надзвичайним ситуаціям природного і терористичного характеру, викликаних пожежами радіоактивно-забруднених лісових масивів. Запропоновано методику прогнозування надзвичайних ситуацій, викликаних пожежами радіоактивно-забруднених лісів України з використанням розвідувальних безпілотних літальних апаратів.

Монографія розрахована на здобувачів вищої освіти другого (магістерського) та третього (освітньо-наукового) рівнів вищої освіти, наукових та науково-педагогічних працівників Державної служби України з надзвичайних ситуацій, всіх, хто цікавиться проблемами забезпечення цивільного захисту.

Рецензенти: докт. техн. наук., с.н.с. Бородіна Н.А.
докт. техн. наук., с.н.с. Тютюнник В.В.
канд. техн. наук. Астахов А.А.

© Качур Т. В., Дівізінюк М. М., Азаренко О. В.,
Собина В. О., Тарадуда Д. В. 2020

ЗМІСТ

ЗМІСТ	3
ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1 ХРОНОЛОГІЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ, ВИКЛИКАНИХ ЗАБРУДНЕННЯМ АТМОСФЕРИ РАДІОАКТИВНИМИ І ОТРУЙНИМИ РЕЧОВИНАМИ	6
1.1 Аналіз найбільш великих катастроф, що сталися на АЕС	6
1.2 Аварії і пожежі, що призводять до викиду радіоактивних та токсичних хімічних речовин в атмосферу.....	8
1.3 Характеристика методів і способів виявлення пожеж лісових масивів.....	10
РОЗДІЛ 2 ФІЗИЧНА МОДЕЛЬ ПОЯВИ РАДІАЦІЙНИХ ПЕРЕДВІСНИКІВ ПОЖЕЖ РАДІОАКТИВНО-ЗАБРУДНЕНИХ ЛІСОВИХ МАСИВІВ	13
2.1 Основні етапи розвитку лісових пожеж.....	13
2.2 Процеси акумулювання деревами і рослинами радіоактивних речовин.....	18
2.3 Особливості пожеж радіоактивно-забруднених лісових масивів...	21
2.4 Фізична модель виявлення радіаційних провісників пожеж радіоактивно-забруднених лісових масивів.....	25
РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗАПОБІГАННЯ НАДЗВИЧАЙНИМ СИТУАЦІЯМ ПРИРОДНОГО І ТЕРОРИСТИЧНОГО ХАРАКТЕРУ, ВИКЛИКАНИХ ПОЖЕЖАМИ РАДІОАКТИВНО-ЗАБРУДНЕНИХ ЛІСОВИХ МАСИВІВ	29
3.1 Хронологія розвитку надзвичайних ситуацій природного і терористичного характеру, викликаних пожежами радіоактивно-забруднених лісових масивів.....	29
3.2 Математичні закономірності класичної теорії пошуку і постановка початкових умов задачі.....	37
3.2.1 Формулювання спільної задачі пошуку об'єктів.....	38
3.2.2 Характеристика умов, які забезпечують вирішення задачі пошуку нерухомій цілі.....	40
3.2.3 Критерії вибору оптимальної стратегії пошуку нерухомій цілі.	46

3.3.	Застосування математичних закономірностей для пошуку радіаційних провісників пожеж радіоактивно-забруднених лісових масивів з використанням розвідувальних безпілотних літальних апаратів і визначення граничних умов рішення задачі.....	56
3.3.1.	Аналіз зміни стратегій пошуку в залежності від зміни часу рішення пошукової задачі.....	56
3.3.2.	Характеристика процедури отримання оптимальних стратегій пошуку.....	58
3.3.3.	Пошукові характеристики безпілотних літальних апаратів та їх вплив на оптимальні стратегії пошуку.....	62
3.4.	Математична модель запобігання надзвичайним ситуаціям природного і терористичного характеру, викликаним пожежами радіоактивно-забруднених лісових масивів.....	70

РОЗДІЛ 4	МЕТОДИКА ПРОГНОЗУВАННЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ, ВИКЛИКАНИХ ПОЖЕЖАМИ РАДІОАКТИВНО-ЗАБРУДНЕНИХ ЛІСІВ УКРАЇНИ З ВИКОРИСТАННЯМ РОЗВІДУВАЛЬНИХ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ.....	73
4.1	Можливості розвідувальних безпілотних літальних апаратів.....	73
4.2	Методика прогнозування надзвичайних ситуацій, викликаних пожежами радіоактивно-забруднених лісів України, з використанням розвідувальних безпілотних літальних апаратів.....	74
4.2.1	Визначення контрольованого району.....	74
4.2.2	Організація пошукової системи безпілотних літальних апаратів.....	75
4.2.3	Розрахунок очікуваних дальностей виявлення бортових пошукових систем.....	75
4.2.4	Визначення загального часу пошуку і його дискретизація.....	79
4.2.5	Організація пошуку джерела загоряння.....	80
4.2.6	Розрахунок ймовірності виявлення джерела загоряння.....	84
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	86

ВСТУП

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

Український народ на собі випробував, що таке наслідки ядерної катастрофи. На сьогоднішній день мовчить 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.

Пожежа в радіоактивно-забрудненому лісі, крім всіх основних негативних чинників пожежі в лісовому масиві, супроводжується викидом в атмосферу радіоактивних продуктів горіння, які конвективними тепловими потоками піднімаються на великі висоти, а потім розносяться в атмосфері вітром. Вражаючі фактори населення і територій в цьому випадку аналогічні дії радіоактивного забруднення при ядерних і радіаційних аваріях.

Особливість поширення радіоактивних продуктів горіння 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 зараження місцевості за сотні і тисячі кілометрів від вогнища загоряння.

Для захисту населення в таких випадках необхідно обмежити вихід людей на вулиці, використовувати респіратори і ватомарлеві пов'язки для дихання, по можливості укрити великі групи людей в спеціальних захисних приміщеннях, які мають властивість герметичності і оснащені фільтровентиляційними установками, які створюють підпір повітря. Але для ефективного виконання цих заходів адміністративні органи і Державна служба з надзвичайних ситуацій України повинні володіти достовірною інформацією про виникнення пожежі в радіоактивно-забруднених лісах.

У зв'язку з вище сказаним, виникає актуальне наукове завдання в галузі цивільного захисту – прогнозування надзвичайних ситуацій, викликаних пожежами радіоактивно-забруднених лісів України, з використанням розвідувальних безпілотних літальних апаратів.

РОЗДІЛ 1

ХРОНОЛОГІЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ, ВИКЛИКАНИХ ЗАБРУДНЕННЯМ АТМОСФЕРИ РАДІОАКТИВНИМИ І ОТРУЙНИМИ РЕЧОВИНАМИ

1.1 Аналіз найбільш великих катастроф, що сталися на АЕС

Провідними вітчизняними і зарубіжними фахівцями з безпеки експлуатації АЕС прийнято вважати класичними надзвичайними ситуаціями три катастрофи, що відбулися на трьох різних континентах. За результатами розслідувань причин їх виникнення і аналізу наслідків розробляються керівні документи для забезпечення безпечної експлуатації ядерних енергетичних установок і пишуться підручники для студентів. Це аварії на АЕС в Три-Майл-Айленд, Чорнобилі та Фукусімі [1].

Американська АЕС Три-Майл-Айленд розташовується на річці Саськуеханна неподалік від міста Гаррісберг, штат Пенсільванія, США. Тут експлуатувалися два енергоблоки, на яких були встановлені водо-водяні реактори з двоконтурною системою охолодження [2-5].

28 березня 1979 року біля четвертої години ранку за місцевим часом сталася аварія. Була серйозно пошкоджена активна зона реактора, і частина ядерного палива розплавилася. Завдяки щасливому випадку розплавлене паливо не пропекло корпус реактора і не привело до вибуху, тому основні радіоактивні речовини залишилися всередині енергоблоку. Однак стався викид в атмосферу благородних інертних газів (аргон, гелій, криптон і ін.) і радіонуклідів (йод-131). Територія атомної станції була заражена радіоактивною водою, що витекла з першого контуру [6-8].

За оцінками експертів, радіоактивність газів, викинутих в атмосферу, склала до $13 \cdot 10^6$ Кюрі [9-12]. Радіоактивність небезпечних нуклідів була оцінена, як незначна. У зв'язку з цим було прийнято рішення не евакуювати все населення, яке проживає поруч зі станцією, але з ініціативи губернатора Пенсільванії була організована п'ятимильна (восьмикілометрова) зона відчуження для вагітних жінок і дітей дошкільного віку.

Середня еквівалентна доза радіації для людей, які живуть в десятимильній (шістнадцятикілометровій) зоні, не перевищила $1 \cdot 10^{-3}$ Зіверта (1 мілізіверта), що можна порівняти з дозою, отриманої людиною при флюорографії [13-15]. Роботи з усунення наслідків аварії були завершені в грудні 1993 року і обійшлися майже в мільярд доларів. Експлуатація другого енергоблоку відновилася в 1985 році [16-19].

Українська (в момент аварії радянська) Чорнобильська АЕС розташовується на березі річки Прип'ять, яка впадає в Дніпро [20-23]. На станції функціонувало чотири енергоблоки з графіто-водяними реакторами типу РБМК-100.

26 квітня 1986 року о пів на другу ночі за місцевим часом в ході проведення проектного випробування турбогенератора на четвертому енергоблоці стався вибух, який повністю зруйнував реактор. Будівля енергоблока і покрівля машинного залу частково обвалилися. У різних приміщеннях четвертого енергоблоку і на його даху виникла велика кількість осередків загоряння, які на п'яту годину ранку були повністю ліквідовані [24-30]. Однак до восьмої години вечора 26 квітня в результаті газо-травлення ядерного палива за рахунок зменшення концентрації ксенону-135 в активній зоні реактора на четвертому енергоблоці виникла пожежа великої інтенсивності, яка тривала досить довго. Внаслідок важкої радіаційної обстановки і великої інтенсивності горіння, гасіння пожежі здійснювалося вертольотами.

В результаті аварії стався викид в навколишнє середовище більше $380 \cdot 10^6$ Кюрі радіоактивних речовин, в тому числі ізотопів урану, плутонію, йоду-131, цезію-134, цезію-137, стронцію-80 [31-37]. Основна частина аварійних робіт була виконана в 1986-1987 роках, в яких взяло участь 240 тисяч осіб. Всього для ліквідації аварії було залучено близько 600 тисяч чоловік.

У перші дні після вибуху основні зусилля були спрямовані на зниження радіоактивних викидів із зруйнованого реактора, після чого почалися роботи з очищення території від радіоактивних уламків та захоронення зруйнованого реактора. Навколо четвертого енергоблоку було зведено бетонний саркофаг, а навколо Чорнобильської АЕС була створена тридцятикілометрова зона відчуження під охороною, з якої відселено близько 200 тисяч осіб, виведено з сільськогосподарського обороту приблизно п'яти мільйонів гектарів землі. Спорожніло місто-супутник АЕС Прип'ять, близько сотні сіл та інших населених пунктів. Для проживання працівників ЧАЕС побудували нове місто-супутник – Славутич. У грудні 1987 року після ремонтно-відновлювальних робіт перші три енергоблоки Чорнобильської АЕС знову були введені в експлуатацію [38-41].

Японська АЕС Фукусіма-1 побудована Токійською енергетичною компанією (ТЕРСО) і є однією з 25 найбільших атомних електростанцій у світі. Розташована вона в місті Окума повіту Футаба префектури Фукусіма [42]. На ній експлуатувалися шість енергоблоків з водо-водяними реакторними установками.

11 березня 2011 року в результаті найсильнішого за час спостереження землетрусу в Японії і наступного за ним цунамі сталася аварія максимального 7-го рівня за Міжнародною шкалою ядерних подій на АЕС Фукусіма-1 [43-48]. Цунамі, що накрило прибережні споруди станції, вивело з ладу зовнішні системи електроживлення і резервні дизельні генератори, що призвело до зупинки всіх живильних систем (нормального і аварійного) охолодження. Це викликало розплавлення активної зони реакторів на першому, другому і третьому енергоблоках, що призвело до вибухів з викидом радіоактивних речовин в атмосферу, які відбулися з 12 по 15 березня. Зона евакуації була розширена з трьох до двадцяти кілометрів. Станом на 23 березня було евакуйовано понад 140 тисяч осіб. З 15 березня в тридцятикілометровій зоні над АЕС

були заборонені польоти. 16 березня посольство США в Японії звернулося до американських громадян, що живуть в радіусі вісімдесяти кілометрів навколо Фукусіми-1, покинути цю територію в якості запобіжного заходу. МАГАТЕ підтвердило звіт Японського агентства з ядерної та індустріальної безпеки, в якому говорилося, що кількість викидів в атмосферу йоду-131 можна порівняти з 10 % викидів Чорнобильської аварії [49, 50].

Таким чином, аварії і катастрофи на АЕС, викликані різними об'єктивними і суб'єктивними факторами, супроводжуються викидом радіоактивних речовин в атмосферу, що призводить до радіаційного ураження населення, радіоактивного забруднення територій і накопичення радіоактивних та інших небезпечних речовин різними видами флори і фауни, особливо лісовими масивами, які потрапили в зону радіоактивних викидів.

1.2 Аварії і пожежі, що призводять до викиду радіоактивних та токсичних хімічних речовин в атмосферу

Попадання радіоактивних та токсичних хімічних речовин в атмосферу може відбуватися через різні техногенні аварій і пожежі. Про це свідчить хроніка надзвичайних ситуацій, що сталися.

У березні 2013 року сталася пожежа на Вуглегірській ТЕС в місті Світлодарську Донецької області, на одному з найбільших енергетичних об'єктів України. В результаті події загинув 44-річний працівник підприємства і ще 13 осіб отримали травми різного ступеня важкості [51-54]. Пожежа сталася через самозаймання вугільного пилу при розгерметизації системи подання вугільного пилу. Збиток від пожежі на Вуглегірській ТЕС склав 173,5 мільйона гривень [55-57].

22 листопада 2002 року на ЗАТ Северодонецьке об'єднання «Азот» (Луганська область) сталася аварія в результаті розриву трубопроводу азотводневої суміші діаметром 80 мм. Потерпілих не було. Витік було ліквідовано [58].

У Луганській області в ніч на 27 серпня 2010 року на території підприємства з виробництва мінеральних добрив ЗАТ «Северодонецьке об'єднання «Азот» стався прорив зовнішнього газопроводу діаметром 250 мм і тиском 35 атм. з послідувачим горінням. Пожежа була ліквідована. Жертв і постраждалих немає [59, 60].

5 лютого 2011 року на Северодонецькому «Азоті» в цеху по виробництву аміачної селітри сталося обвалення секції транспортерної галереї довжиною близько 40 м. Галерея впала на естакаду з комунікаціями і повністю її зруйнувала. В результаті інциденту ніхто не постраждав. На підприємстві проведені активні відновлювальні роботи [61].

8 січня 2015 року внаслідок аварійного відключення турбіни на Північнодонецькій ТЕЦ – одній з найбільших в Україні теплоелектроцентралей, призначеної для тепло- і електропостачання міста Северодонецька і гіганта

хімічної промисловості «Азот», було припинено подачу тепла. подача електроенергії в місто була переключена на Счастінську ТЕЦ.

В результаті всіх вище згаданих інцидентів сталися викиди небезпечних речовин в атмосферу, за фактом яких були відкриті кримінальні провадження [62].

28 квітня 2015 року в Чорнобильській зоні виникла пожежа величезної інтенсивності. До 3 травня вогонь охопив понад триста гектарів лісу. Пожежа, поширюючись по верхівках дерев, швидко рухалася до атомної станції. До її ліквідації було залучено понад 300 осіб і 51 одиниця техніки, у тому числі літаки і вертольоти. 30 червня сталася друга пожежа на території «Чорнобильської пущі». Це були дві послідовні великі пожежі за три місяці [63-69].

17 липня 2016 року виниклі загоряння лісової підстилки та чагарнику на площі до 15 гектарів в районі колишнього населеного пункту Буряківка. В гасінні пожежі задіяні 20 одиниць техніки та 81 людина особового складу ДСНС України, а також вертоліт Мі-8 і три літаки Ан-32П. Мер Славутича – міста, де живуть переселенці з Чорнобиля і персонал, що обслуговує Чорнобильську АЕС, неодноразово наголошував, що ці пожежі супроводжуються викидом радіоактивних продуктів горіння в атмосферу. Він також заявляв, що загоряння в Поліському регіоні трапляються щорічно і виникають або самотійно, або через «людський фактор» [70-72].

6 травня 2004 року на складі 275-ї бази зберігання артилерійських боєприпасів стався спалах, в результаті якого почали вибухати артилерійські снаряди та інші боєприпаси. В результаті вибухів загинуло 5 осіб та 4 постраждало, 81 особа була госпіталізована. Повністю пожежу вдалося ліквідувати лише до 19 травня. Висота полум'я досягала 300 метрів, вибухи лунали кожні 3-5 секунд. Снаряди розліталися на відстань до 10 кілометрів. В результаті, крім самої Новобогданівки, від вибухів постраждали ряд сусідніх населених пунктів. Понад сім тисяч жителів були евакуйовані. Було припинено автомобільне сполучення на автомагістралі М-18 Харків – Сімферополь, залізничне сполучення на лінії Мелітополь – Запоріжжя, припинено газопостачання Мелітополя. Причиною загоряння на складі слідство визнало грубе порушення військовослужбовцями правил пожежної безпеки [73-77].

23 липня 2005 ситуація повторилася, але з менш масштабними наслідками. Пожежа з подальшою детонацією артилерійських снарядів на території 275-ї бази зберігання артилерійських боєприпасів вдалося локалізувати за 3,5 години. В результаті надзвичайної ситуації одна жінка отримала осколкові рани і була госпіталізована. Рух залізничного та автомобільного транспорту був відновлений менш, ніж через добу після вибухів. Причиною вибухів стало самозаймання димової міни під дією високої температури навколишнього середовища [78-81].

В кінці липня - початку серпня 2006 року на території військової бази ще чотири рази відбувалося мимовільне загоряння боєприпасів, але вогонь був оперативно ліквідований. 19 серпня 2006 у 14.15 стався ще один серйозний вибух [82-87].

Таким чином, аварії і пожежі, що призводять до викиду радіоактивних та токсичних хімічних речовин в атмосферу, трапляються в результаті об'єктивних і суб'єктивних причин. В сучасних умовах ведення гібридної війни на сході країни не можна виключати можливість злого умислу в людському факторі, який викликає техногенні аварії та неконтрольовані пожежі, що призводять до сильних пожеж в лісах, які зазнали радіоактивного зараження, що викликає вторинне радіаційне забруднення територій продуктами згоряння. Більш того, треба бути готовим до відкритого терористичного і диверсійного впливу, яке може проявлятися в їх навмисному підпалі.

1.3 Характеристика методів і способів виявлення пожеж лісових масивів

Все різноманіття методів і способів виявлення лісових пожеж умовно зводиться до п'яти основних напрямків вирішення цього непростого завдання.

Перший напрямок – це виявлення пожеж зі спеціальних вишок [88-90], які розташовані на височинах, пагорбах, пагорках та інших природних висотах і дозволяють оглядати прилеглу місцевість. Спостерігач може використовувати оптичні прилади і візуально виявляти появу диму і вогню – первинних факторів, що свідчать про початок пожежі. Система такого спостереження використовується протягом декількох століть. Радіус візуального спостереження при хорошій видимості становить близько 30 км. Головним її недоліком є необхідність спорудження висотних наглядових конструкцій і залучення відносно великої кількості людей для постійного ведення протипожежного спостереження. Крім цього, дальність спостереження залежить від прозорості (стану) нижніх шарів атмосфери.

Другий напрямок – це виявлення пожеж за допомогою контролю лісового масиву пожежними патрулями, лісничими, місцевими жителями і відпочиваючими [91-93]. Така система спостереження також використовується відвіку. В сучасних умовах наявність мобільного зв'язку допомагає своєчасно отримувати інформацію і охоплювати досить великі території. Недоліком цього напрямку є те, що для його реалізації необхідно залучати велику кількість людей, при цьому на точність і своєчасність виявлення пожежі великий вплив робить людський фактор (людина може втомитися, заснути), а контролювати велику кількість людей на величезній території досить складно.

Третій напрям – це огляд територій з повітря з використанням пілотованих і безпілотних літальних апаратів [94-97]. Літальні апарати (літаки і вертольоти) переміщаються досить швидко навіть у порівнянні з автомобільними транспортними засобами і дозволяють за досить нетривалий проміжок часу оглянути велику територію, тому головна перевага цього напрямку – оперативність.

Використання безпілотних літальних апаратів, безумовно, дешевше пілотованих і вимагає набагато менше інфраструктури для їх застосування, на-

приклад, наявність злітно-посадкової смуги, наземних навігаційних систем забезпечення літаків і вертольотів, аварійно-рятувальних служб забезпечення польотів та інші. Проте, години польоту спеціального літака або вертольота коштує дорого. Необхідно залучати спеціально навчених людей: пілотів і штурманів здатних орієнтуватися на місцевості. Відсутня можливість оглядати територію безперервно, і тому не завжди вдається виявити пожежу вчасно.

Для безпілотного літального апарату також відсутня можливість безперервного огляду територію, тому також не завжди вдається виявити пожежу вчасно. Він коштує дорого, і його не можна використовувати для інших цілей, наприклад, для перевезення вантажів або пасажирів, використовувати для сільськогосподарських потреб і т. п.

Четвертий напрямок – це застосування систем відеомоніторингу [98-100]. Системи, розроблені та застосовані в минулому столітті, являють собою телеустановки в складі керованої 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:

1) 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;

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

3) отримання можливості детального розгляду виявленого об'єкту 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.

Головний недолік цих систем – неможливість визначення координат місця, де сталася пожежа. Крім того, у кожній вишки повинен чергувати оператор, що знімає і передає дані з камери. Однак останнє десятиліття було ознаменовано розвитком електроніки, зв'язку і цифрових систем, що 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 (з наявністю електричного

живлення і каналів зв'язку) як на території великих населених пунктів, так і в сільській місцевості, в тому числі і на територіях, прилеглих до лісових масивів.

Всі перераховані передумови привели до виникнення нового напрямку в розвитку систем відеомоніторингу лісу, що полягає в максимальному використанні існуючої інфраструктури вишок і каналів зв'язку для розміщення обладнання відеоспостереження і здійснення відеомоніторингу лісових масивів.

П'ятий напрям – визначення місця пожежі з штучних супутників Землі [101-105]. Наявність супутникових даних високої просторової роздільної здатності на основі геоінформаційної системи (ГІС) дозволяє не тільки виявляти пожежі, але прогнозувати їх наслідки. Приймальний комплекс приймає 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. 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. 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:

- підвищення точності виявлення осередків полум'я пожежі;
- скорочення помилкових повідомлень;
- виявлення різних типів загоряння;
- необхідність розробки загальної математичної моделі лісових пожеж,

яка дозволить удосконалити методіку прогнозу лісової пожежної небезпеки.

Таким чином, серед існуючих в даний час методів і способів виявлення лісових пожеж, умовно поділюваних на п'ять напрямків, відсутні методи і способи прогнозування загорянь і виявлення вісників пожеж лісових масивів взагалі і розташованих в зоні радіоактивного зараження зокрема.

РОЗДІЛ 2

ФІЗИЧНА МОДЕЛЬ ПОЯВИ РАДІАЦІЙНИХ ПЕРЕДВІСНИКІВ ПОЖЕЖ РАДІОАКТИВНО-ЗАБРУДНЕНИХ ЛІСОВИХ МАСИВІВ

Для формалізованого опису фізичної моделі появи радіаційних провісників пожеж в лісових масивах, розташованих в зоні радіоактивного зараження, отже, радіоактивно-забруднених, необхідно спочатку розглянути основні етапи розвитку лісових пожеж, характерних для лісових масивів різних регіонів України, в горах і на рівнинах. Проаналізувавши процес акумулювання деревами і рослинами радіоактивних речовин, що надходять з ґрунту, ґрунтових вод, атмосферних опадів та іншими шляхами, систематизувати особливості пожеж лісових масивів, розташованих в зоні радіоактивного зараження місцевості, і описати отриману фізичну модель появи радіаційних провісників пожеж радіоактивно-забруднених лісових масивів.

2.1 Основні етапи розвитку лісових пожеж

В даний час прийнято вважати [106-109] що, лісова пожежа – це стихійне некероване поширення вогню по лісовій площі, яке має характерні елементи (складові частини). До них відносяться місце виникнення пожежі, яке можна вважати точковим об'єктом, і площа, пройдена вогнем, що представляє собою спустошену вигорілу пляму. Вона орієнтована в просторі в залежності від напрямку його росту або поширення вогню, яке, як правило, визначається напрямом вітру (напрямоком руху повітряного потоку нижніх шарів атмосфери). Структурно така пляма умовно ділиться на частини: задня – тил або п'ята, передня – фронт пожежі або голова, ліва і права частини, відповідно, лівий і правий фланги. Контур плями називають кромкою пожежі. Фронт пожежі не буває прямолінійним, має виступи або язички і западини або кишені, як показано на рис. 2.1.

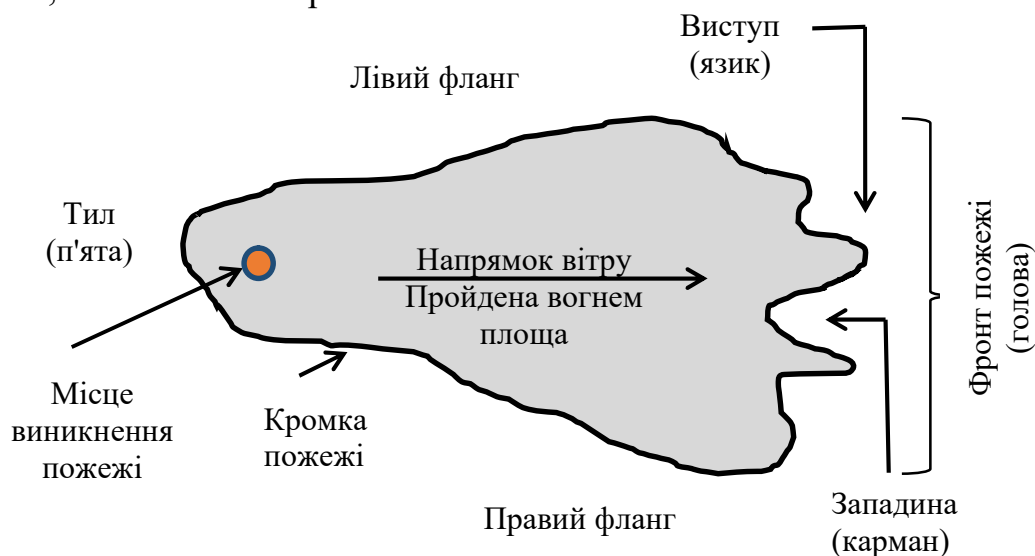


Рис. 2.1 – Елементи лісової пожежі

Розвиток пожежі надає площі, пройденої вогнем, певну форму. Округла форма спостерігається при рівномірному поширенні вогню в безвітряну погоду при однорідних горючих матеріалах і відносно рівній місцевості. Нерівномірна (різнобічна) форма відзначається при змінному вітру, різномірних горючих матеріалах, пересіченій місцевості. Еліптична (витягнута) форма спостерігається при вітру, відносно рівній місцевості, однорідності горючих матеріалів.

Лісові пожежі прийнято розділяти на три види: низові, верхові та підземні (або торф'яні).

Низова пожежа характеризується поширенням вогню по надґрунтовому покриву. Тут горить лісовий опад, що складається з дрібних гілок, кори, хвої, листків і лісової підстилки: суха трава і трав'яниста рослинність, а також живий надґрунтовий покрив з трав, мохів, невеликого підросту. У ряді випадків горить кора в нижній частині стовбурів дерев.

За швидкістю поширення вогню і характером горіння низові пожежі бувають швидкі й стійкі. Побіжна низова пожежа, як правило, розвивається у весняний період, коли підсихає лише самий верхній шар дрібних горючих матеріалів надґрунтового покриву і торішня трав'яниста рослинність. Швидкість поширення вогню досить висока, може досягати 300 м/год, і безпосередньо залежить від швидкості вітру в приземному шарі.

При горінні залишаються незачепленими вогнем ділянки з підвищеною вологістю покриву, і площа, пройдена вогнем, має плямисту будову. У хвойних насадженнях з низько опущеними кронами побіжна низова пожежа може перейти в верхову.

Стійка низова пожежа характеризується повним згорянням надґрунтового покриву та лісової підстилки. Вони розвиваються, як правило, в середині літа, коли підстилка просихає по всій товщині залягання. На ділянках, пройдених стійкою пожежею, згоряє повністю підріст, підлісок і лісова підстилка. Якщо обгорають коріння і кора дерев, то лісове насадження отримує серйозні пошкодження. У цьому випадку частина дерев припиняє зростання і гине. На торф'яних ґрунтах такі пожежі можуть перейти в підземні, а в молодняках і багатоярусних насадженнях з наявністю хвойного підросту – в верхові пожежі. Швидкість поширення вогню при стійкій пожежі від декількох метрів до 180 м/год.

Низові пожежі домінують. Статистикою Сполучених Штатів, Канади, Великобританії, Російської Федерації та інших країн середніх широт відзначається, що в середньому вони становлять від 80-85 до 90-95 %, а охоплювана ними площа від 60-65 до 85-90 % від усіх зафіксованих випадків лісових пожеж.

Верхова пожежа (побіжна і стійка) поширюється по кронах дерев [110-112], при цьому найчастіше горить весь деревостій. Виникнення і розвиток верхових пожеж найчастіше відбувається від низових в деревостанах з низько опущеними кронами. Верхові пожежі досить часто виникає в різновікових хвойних лісах, в багатоярусних насадженнях і лісах з рясним підростом.

Верхова пожежа – досить часте явище в гірських лісах. Швидкість поширення верхових пожеж сягає 300-1500 м/год для стійких пожеж і 4000-5000 м/год для збіглих. Найбільш схильні до верхових пожеж хвойні молодняки на сухих місцях розташування, зарості кедрового стланика і дубу чагарникової форми (навесні при наявності сухого торішнього листя), в гірських лісах – всі хвойні насадження у верхній частині крутих схилів або на перевалах.

Виникненню верхових пожеж в значній мірі сприяють посухи і сильні вітри. Європейською і світовою статистикою відзначається, що кількість випадків верхових пожеж становить від 0,5-1,5 до 2,0-4,5 %, а пройдена ними площа від 10-12 до 11,5-15 % площі всіх зареєстрованих пожеж.

Ґрунтова пожежа розвивається в результаті «заглиблення» вогню низової пожежі в нижні шари підстилки і торф'яного шару ґрунту. При ґрунтовій пожежі згорають корені, дерева вивалюються і падають, як правило, вершинами до центру пожежі. Згарище в більшості випадків має круглу або овальну форму. Швидкість поширення вогню незначна. Вона може бути від декількох десятків сантиметрів до кількох метрів на добу. Відповідно до Європейської і світової статистики число ґрунтових пожеж становить від 0,1-0,3 до 0,5-1,0 %, а площа від 0,1-0,2 до 0,5-1 % всіх зафіксованих пожеж. Однак необхідно відзначити, що в окремі посушливі роки ці показники можуть бути вищими.

Виникнення, поширення і розвиток лісових пожеж залежать, в основному, від рельєфно-ландшафтних, рослинних, погодних та інших умов, які необхідно враховувати, щоб правильно прогнозувати можливість їх появи.

Тут особливо важливо знати основні умови і фактори, що впливають на поведінку пожежі, тобто фактори, що обумовлюють процес горіння, його інтенсивність (збільшення швидкості поширення) і напрям.

Горіння лісових горючих матеріалів, що викликає лісову пожежу, являє собою сукупність явищ, якими супроводжується реакція, що проходить під впливом високої температури, кисню повітря і горючих матеріалів. У лісі в достатку є горючі матеріали і кисень повітря. Джерело високої температури (вогонь), яке може викликати горіння, потрапляє ззовні. Це може бути залишена без нагляду і розведена поза встановленим місцем ватра, палаючий недопалок або сірник, іскри з вихлопних труб різних механізмів, випалювання залишків минулорічної рослинності і пального мотлоху та інші джерела вогню, пов'язані з діяльністю людини, а також розряди блискавок.

Процес горіння послідовно проходить наступні фази або етапи:

- попереднє нагрівання і підсушування з виділенням водяного пару (120 °С);
- висихання і горіння з виділенням водяного пару, горючих речовин (кислот, смол), яке відбувається при температурі 260 °С;
- займання газів (315-425 °С);
- полум'яне горіння з виділенням диму, вуглекислого газу, водяного пару і незгорілих газів (650-1095°С);

- обвуглювання і горіння вугілля до повного згорання горючих матеріалів [113-115].

У процесі горіння виділяється велика кількість тепла, яка надходить в навколишнє середовище. В результаті конвекції відбувається поширення високих температур шляхом підйому маси гарячого повітря над місцем горіння у вигляді конвекційної колонки. При випромінюванні поширення високих температур у вигляді променевої енергії здійснюється по радіусу в усіх напрямках від джерела горіння. Властивість провідності забезпечує поширення високих температур по горючих матеріалах від вогнища горіння.

Крім тепла, що виділяється, існує багато чинників, що визначають подальшу поведінку пожежі, проте основними з них, які надають вирішальний вплив на поширення пожежі, є горючий матеріал, погодні умови і рельєф місцевості.

Лісові горючі матеріали за умовами загорання можна розділити на дві основні групи: легкозайmistі та швидко горючі матеріали.

До першої групи належать суха трава, відмерле листя, хвоя, дрібні гілки, сучки, деякі чагарники, самовисів та ін. Ці горючі матеріали забезпечують швидке поширення вогню і служать запальниками для повільно зайmistих матеріалів.

Повільно зайmistі лісові горючі матеріали або друга група матеріалів – це хмиз, пні, нижні шари лісової підстилки, чагарники і дерева, при горінні виділяють велику кількість тепла, що сприяє розвитку пожежі.

Вид горючих матеріалів, їх кількість, стан і розподіл по лісовій площі мають основне значення в поширенні лісових пожеж, визначенні швидкості їх поширення та інтенсивності горіння. Особливу небезпеку становить мертвий запас горючих матеріалів, кількість якого в залежності від деревини, віку і типу насадження складає в середньому від 3-8 до 50-60 т/га. Важливу роль в поширенні вогню грає рівномірність і безперервність розподілу горючих матеріалів по площі.

Погодні умови мають вирішальне значення для поширення пожежі, так як дощі і висока вологість обмежують і припиняють горіння. Сильні вітри, навпаки, сприяють поширенню вогню. Тиха погода і зниження температури повітря, особливо в нічний час, стабілізують горіння і знижують його інтенсивність. Суха спекотна погода створює найсприятливіші умови для виникнення і поширення вогню. Практика показує, що основними факторами, які враховуються і впливають на поширення пожежі, є: вітер, вологість, лісові горючі матеріали і їх запас, температура повітря і рельєф.

Вітер. Під впливом вітру горючі матеріали висихають, збільшується швидкість поширення горіння, особливо верхових лісових пожеж. Це сприяє виникненню нових осередків горіння шляхом перенесення палаючих частинок. Лісова пожежа викликає виникнення локальних повітряних потоків, чим посилює вплив переважаючого вітру на поширення вогню.

Повітря над поверхнею вогню нагрівається і піднімається вгору. На його місце спрямовується свіже, багате киснем, повітря, що сприяє процесу го-

ріння. В результаті над пожежею утворюється конвекційна (теплова) колонка, в якій часто знаходяться палаючі гілки, пучки хвої, які піднімаються над лісовим масивом, а потім опускаються на ліс на відстані 200-300 м і більше від основного вогнища горіння, (в залежності від швидкості вітру і нахилу конвекційної колонки) і створюють нові осередки горіння.

Вологість повітря. У повітрі завжди присутня волога у вигляді водяного пару. Кількість вологи, що міститься в повітрі, відбивається на вмісті вологи горючими матеріалами. Вологість горючого матеріалу є важливим фактором, що впливає на хід гасіння пожежі, оскільки сирий матеріал, як і більшість видів зеленого пального матеріалу, не горить. Вдень повітря зазвичай сухіше, чим вночі, тому вночі пожежі (при звичайних умовах) горять (поширюються) повільно, так як горючі матеріали поглинають вологу з більш сирого нічного повітря. Зокрема, це відноситься до сухої трави, хвої, дрібного гілля та інших легких горючих матеріалів.

Поглинання вологи горючим матеріалом, спрямовані вниз по схилу вітри, більш низька нічна температура, а також інші елементи нічний погоди зазвичай сприяють локалізації лісової пожежі.

Добовий цикл розвитку лісової пожежі приблизно наступний:

- максимальна інтенсивність горіння з 9 до 21 години;
- її зниження з 21 до 4 годин;
- слабка інтенсивність горіння з 4 до 6 год (в основному безполуменевого горіння);
- збільшення інтенсивності горіння з 6 до 9 годин.

Відомо, що нагрітий на сонці палий матеріал втрачає вологу і горить швидше, ніж при відсутності прогріву. Температура поверхні ґрунту впливає також на рух повітряних потоків. Вона безпосередньо впливає і на людей, ускладнюючи їх роботу.

Рельєф місцевості, особливо гірський, надає своєрідний вплив на поширення пожеж. Протягом дня, у міру того, як сонце нагріває земну поверхню, відбувається нагрів і підйом вгору шарів повітря, що знаходяться у землі. Тому протягом дня повітряні потоки зазвичай течуть вгору по балкам і схилах.

Ввечері та вночі поверхня землі охолоджується, повітряні потоки змінюють свій напрямок і течуть вниз по балкам і схилах.

Що стосується вітрових потоків, то вони пов'язані аналогічною закономірністю: вдень вітер дує вгору по схилу, а вночі – вниз по схилу. Це важливо пам'ятати при прогнозуванні поширення пожежі.

У гірських умовах напрямок і швидкість поширення пожежі залежать від експозиції і крутизни схилів. Пожежа легко поширюється вгору по схилу, і чим крутіше схил, тим вище швидкість руху, якщо вітер не володіє силою, здатною змінити цю ситуацію. При підйомі вгору по схилу вогонь пожежі знаходиться на незначній відстані від нижньої частини крон дерев, що викликає їх підігрів, підсушування і більш швидке займання. Тепле повітря піднімається вгору по схилу і викликає тягу, в результаті чого збільшується

швидкість поширення вогню. У той же час на крутих схилах палаючі матеріали можуть скочуватися вниз і створювати нові осередки горіння.

Пора року має великий вплив на виникнення та інтенсивність розвитку лісових пожеж. Так, ранньовесняні пожежі – в основному низові збігли (плямисті) – розвиваються по сухій трав'янистій рослинності зі швидкістю, яку їм надає вітер. Весняно-літні, як правило, це низові пожежі, при яких згорає поверхневий покрив ґрунту і частково гумус лісової підстилки. Вони більш стійкі. При певних умовах (вітер, низько розташовані гілки крон хвойних порід, наявність підросту та інші) вогонь може перейти в верхову пожежу (на крони дерев) і повністю знищити насадження. Літні та літньо-осінні низові пожежі досить стійкі. Вони знищують напочвенний покрив, підлісок, весь шар гумусу і поверхневі корені деревних порід. При наявності торф'яних ґрунтів вогонь заглиблюється, переходячи в підземну пожежу. Осінні лісові пожежі в основному низові і розвиваються тільки в денний час. Вночі через низьких температур повітря і вологості горіння сповільнюється і частково припиняється.

Таким чином, все різноманіття лісових пожеж на рівнині і в горах поділяються на низові, верхові, підземні. Залежно від швидкості поширення та інтенсивності горіння вони бувають стійкими і швидкими. Розвиток пожежі умовно розділяється на п'ять етапів: загоряння або появу джерела вогню, пов'язаного з діяльністю людини або природного явища; попередній нагрів і підсушування з виділенням водяного пару; висихання і горіння з виділенням горючих речовин; займання газів; полум'яне горіння з виділенням диму, вуглекислого газу, водяного пару і незгорілих газів. Головними чинниками, що визначають розвиток лісової пожежі, є стан і розподіл на місцевості горючого матеріалу, характеристика і прогноз погодних умов, параметри рельєфу місцевості.

2.2 Процеси акумулювання деревами і рослинами радіоактивних речовин

Будь-яка жива речовина, будь то рослина, чагарник, дерево або будь-яка інша виконує ряд певних життєвих функцій:

1) газова, яка складається в поглинанні одного і виділення іншого виду газу, наприклад, поглинання вуглекислого газу і виділення кисню;

2) окисно-відновна – полягає в окисненні і відновленні речовин усередині живих організмів;

3) біохімічна – це функція розмноження і росту організмів всередині однієї системи;

4) концентраційна функція [116-118], яка проявляється в здатності живих організмів акумулювати різні хімічні елементи із зовнішнього середовища (атмосфери, води, ґрунту). Деякі організми накопичують ряд елементів в концентраціях, на порядки перевищують їх вміст у природному середовищі.

Наслідком концентраційної функції живих організмів є геохімічні аномалії, локальні скупчення деяких хімічних елементів.

Газова функція здійснюється рослинами в процесі фотосинтезу, в результаті чого вони поповнюють атмосферу киснем, і всіма рослинами і тваринами, що виділяють вуглекислий газ в процесі дихання. Відбувається також пов'язаний з життєдіяльністю організмів круговорот азоту.

Окисно-відновна функція полягає в хімічних перетвореннях речовин з утворенням солей, кислот, (гідр) оксидів і інших класів хімічних сполук в результаті окисно-відновних процесів, внаслідок чого відбувається формування залізних і марганцевих руд, вапняків і т. п.

Біохімічна функція здійснюється в процесі обміну речовин в живих організмах (живлення, дихання, виділення) і деструкції відмерлих організмів і продуктів їх життєдіяльності. Біохімічна функція – основа круговороту елементів в біосфері.

Існує поняття біогеохімічної енергії як роботи, що здійснюється окремим організмом або їх сукупністю, по акумулюванню, метаболізму (перетворенню) і розсіюванню хімічних елементів. В даний час для оцінки організмів в міграції хімічних елементів, в першу чергу, радіонуклідів, використовуються коефіцієнти їх переходу з однієї системи в іншу [119-121].

При перенесенні повітряним потоком радіоактивних речовин, що утворилися, наприклад, в результаті ядерних і радіаційних аварій, частина радіонуклідів опускається і затримується кронами дерев, осідаючи на листях, хвої і корі. Інша частина радіоактивних речовин потрапляє під полог дерев в трав'яний покрив, лісову підстилку і ґрунт. Частка радіонуклідів, що затримуються в запоні лісу, варіює залежно від складу, зімкнутості, форми і фази вегетації деревної рослинності.

Радіонукліди частково проникають у внутрішні тканини наземної частини деревно-чагарникової рослинності, в результаті через рік після випадання радіоактивних речовин частка їх в кронах, особливо в листяних насадженнях, знижується в кілька разів, при цьому зростає забрудненість лісової підстилки і ґрунту. На глибині до 5 см зосереджується більше 90 % радіонуклідів. У хвойних лісах самоочищення відбувається повільніше. Зазвичай на це потрібно 3-4 роки [122-124].

Переміщаючись в лісовій підстилці і ґрунті, радіонукліди ними міцно фіксуються і проникають зазвичай до глибини 10 см. В подальшому ліс надійно запобігає перенесення радіонуклідів з водою і вітром, сприяючи тим самим стабілізації радіоекологічної обстановки на забруднених землях.

Однак з часом в забрудненому лісі посилюється процес кореневого надходження радіонуклідів в лісову рослинність. Найбільший вміст радіонуклідів (75 %) виявляється в підстилці сосняків, менше (50 %) – березняків, ще менше (30 %) – вільшаників і дубів. За три роки з моменту Чорнобильської аварії міграція радіонуклідів відзначалася на глибину 10-15 см.

В даний час гамма-активність ґрунтів і рослин в основному обумовлена ^{137}Cs , бета-активність – ^{90}Sr , альфа-активність – ізотопами ^{238}Pu , ^{239}Pu і ^{240}Pu .

В живому надґрунтовому покриві лісових насаджень високої питомою радіоактивністю володіють зелені мохи – $3,7 \cdot 10^5$ Бк/кг (10^{-5} Ки/кг), а також лишайники – $3,7 \cdot 10^6$ Бк/кг (10^{-4} Ки/кг).

Шапінкові гриби повсюдно акумулюють радіонукліди і можуть мати значну радіоактивність від $3,7 \cdot 10^5$ до $3,7 \cdot 10^6$ Бк/кг (10^{-5} - 10^{-4} Ки/кг), що на два порядки вище, ніж у судинних вищих рослин.

Велика активність відзначається також у суниці від $3,7 \cdot 10^3$ до $3,7 \cdot 10^4$ Бк/кг (10^{-7} - 10^{-6} Ки/кг), малині від $3,7 \cdot 10^4$ до $3,7 \cdot 10^5$ Бк/кг (10^{-6} - 10^{-5} Ки/кг) і чорниці $3,7 \cdot 10^4$ Бк/кг (10^{-6} Ки/кг) за рахунок акумулювання ^{90}Sr , ^{238}Pu , ^{239}Pu і ^{240}Pu .

Кореневе поглинання радіонуклідів рослинами та інтенсивність включення їх в процеси міграції по біологічних ланцюгах визначається типом ґрунту і фізико-хімічної природою елемента. Швидкість і розміри кореневого засвоєння радіонуклідів рослинами визначаються розчинністю радіоактивних речовин, фізико-хімічними властивостями ґрунтів і фізіологічними особливостями рослин.

Так як радіонукліди різних елементів сорбуються ґрунтово-поглинаючим комплексом неоднаково, то і перенесення їх з ґрунту в рослини відбувається по-різному. Накопичення радіонуклідів сильно залежить від типу ґрунтів: гірше вони всмоктуються з сіроземів і чорноземів, а найкраще з торфоболотних і легких ґрунтів (піщані і підзолисті). Червоноземи і лучно-карбонатні ґрунти займають проміжне положення.

При некореновому шляху надходження найбільш рухомим є ^{137}Cs . Надходження ^{90}Sr та інших радіонуклідів відбувається при цьому в десятки разів повільніше. При кореновому надходженні найбільш рухомим є ^{90}Sr . ^{137}Cs сильніше сорбується ґрунтом, і тому у відносно менших кількостях переходить з ґрунту в рослини.

За кореневого шляху з ґрунту в усі наступні роки після випадання радіонуклідів відбувається забруднення грибів, ягід, дикорослих плодів, лікарських і кормових рослин. У лугових ґрунтах радіонукліди адсорбовані в шарі дернини глибиною 0,5 см. Міграція їх по профілю ґрунту відбувається дуже повільно. На луках, забруднених чорнобильськими викидами, після розпаду короткоживучих радіонуклідів радіоактивність обумовлюється, в основному, радіонуклідами ^{137}Cs і ^{90}Sr .

У трав'янистих видів йде значне накопичення ізоотопів цезію і стронцію. При утриманні ^{90}Sr в ґрунті до $1,11 \cdot 10^{12}$ Бк/км² (30 Ки/км²) в рослинах накопичується його від $1,7 \cdot 10^3$ до $8,14 \cdot 10^3$ Бк/кг (от $4,6 \cdot 10^{-8}$ Ки/кг до $2,2 \cdot 10^{-7}$ Ки/кг). Це дуже високе забруднення.

Як показали спостереження, рослини природних кормових угідь завжди характеризуються більш високою питомою радіоактивністю, ніж сіяні трави і різних сільськогосподарських культур. Пояснюється це тим, що радіонукліди в ґрунтах природних кормових угідь зосереджені, в основному, в шарі від 0 до 5 см, створюючи там високу концентрацію радіоактивних ізоотопів в одиниці об'єму ґрунту. При перерахуванні ґрунту концентрація радіонуклідів знижується, і створюються умови для їх зменшені засвоєваності ро-

слинами. Це підказує шлях поліпшення природних кормових угідь в умовах радіаційного забруднення.

За рахунок кореневого надходження також відбувається накопичення радіонуклідів і в деревині. За здатністю до накопичення рослинами радіонукліди утворюють ряд:



Більшість штучних радіонуклідів міцно сорбується ґрунтовим комплексом, що поглинає, і включаються в біологічний круговорот в порівняно невеликих кількостях. Виняток становлять ^{65}Zn , ^{89}Sr и ^{90}Sr , що відрізняються найбільшою рухливістю в системі «ґрунт-рослина».

Найбільшою здатністю накопичувати ^{137}Cs відрізняються травостої природних пасовищ і сінокосів, що обумовлено, з одного боку, акумуляцією дерниною радіонуклідів в найбільш доступній для рослин формі, а з іншого боку, особливостями формування кореневої системи природними лукопасовищними культурами в порівнянні з польовими кореневими культурами.

Оскільки накопичення радіонуклідів у врожаї сільськогосподарських рослин визначається концентрацією їх в ґрунті і біологічною доступністю, коефіцієнти пропорційності для різних культур неоднакові.

Поглинання радіонуклідів рослинами з ґрунту залежить також від її складу. Ґрунти важкого гранулометричного складу відрізняються більшою поглинальною здатністю, ніж легкі. Істотний вплив на перехід з ґрунту в рослини ^{137}Cs надає вміст у ній органічної речовини. Цей радіонуклід надходить у рослини з торф'янистих ґрунтів в кілька разів більше, ніж з мінеральних ґрунтів. У природі харчові ланцюги не ізольовані одна від одної, а тісно переплетені і утворюють складну розгалужену мережу. Механізми, за допомогою яких радіонукліди надходять в рослини і дерева, аналогічні механізмам, за допомогою яких вони отримують необхідні для їх росту неорганічні речовини з ґрунту.

Таким чином, радіоактивні речовини, що потрапили в ґрунт в результаті Чорнобильської катастрофи, надходять в дерева з ґрунту разом з речовинами, необхідними їм для росту, накопичуються в деревах в кількостях, концентрація яких в рази перевищує їх первісну концентрацію в ґрунті. Крім цього, акумулювання радіоактивних речовин відбувається в лісовій підстилці – наповненому покріві, що утворений опадом, який розкладається.

2.3 Особливості пожеж радіоактивно-забруднених лісових масивів

Радіоактивна лісова пожежа – це лісова пожежа, при якій горять забруднені радіонуклідами лісові горючі матеріали. Утворені при цьому продукти горіння (зола, недопал, димовий аерозоль, газоподібні продукти) представляють собою відкриті джерела іонізуючого випромінювання [125].

На думку фахівців-радіологів, радіоактивна лісова пожежа представляє собою відкрите об'ємне джерело іонізуючого випромінювання. Продукти горіння, що містять радіонукліди, разом з висхідними повітряними потоками піднімаються вгору і можуть переміщатися на значні відстані. Радіаційна небезпека від димових аерозолів з високою концентрацією радіонуклідів полягає, по-перше, в ризику додаткового опромінення населення інгаляційним шляхом, по-друге, вторинним забрудненням територій.

Крім цього, на місці згарищ утворюється до 700-900 т золи і недопалу на один гектар з активністю, близькою активності низькоактивних твердих радіоактивних відходів.

Як було зазначено раніше в пункті 2.1, головними чинниками, що визначають розвиток лісової пожежі, є стан і розподіл на місцевості горючого матеріалу, характеристика і прогноз погодних умов, параметри рельєфу місцевості, при цьому процес розвитку пожежі складається з п'яти етапів:

- загоряння або поява джерела вогню, пов'язаного з діяльністю людини або природного явища;
- попереднє нагрівання і підсушування з виділенням водяного пару;
- висихання і горіння з виділенням горючих речовин;
- займання газів;
- полум'яне горіння з виділенням диму, вуглекислого газу, водяного пару і незгорілих газів.

Розглянемо особливості їх протікання для випадку виникнення і розвитку радіоактивних лісових пожеж.

Займання – це початок горіння під дією джерела запалювання, який зазвичай носить природний або антропогенний характер. Найпоширенішими природними джерелами загоряння є блискавки – на їх частку припадає менше 10 % загорянь. Фахівці стверджують, що пожежі, викликані природними причинами, сприяють оновленню і лісу, і природи в цілому [126]. Вони також стверджують, що в лісах, де росте величезна кількість молодих дерев, ймовірність загоряння через блискавки набагато менше, ніж в лісових масивах, що складаються з сухих і старих дерев.

Більшість лісових пожеж на нашій планеті виникає все ж у результаті людської діяльності. В першу чергу, лісові пожежі відбуваються через недбалість людини. Це може бути випадково кинутий недопалок або сірник, які стають джерелом запалювання. У ряді випадків загоряння відбувається через не до кінця загашені багаття.

Іноді пожежі викликають навмисно (наприклад, для боротьби з шкідливими комахами або хворобами дерев), тоді вони дуже рідко виходять з-під контролю. Однак наймасштабніші пожежі виникають через навмисні підпали лісу з метою їх подальшої вирубки або для штучного створення надзвичайних ситуацій в регіоні. Займання, як правило, відбувається приховано, і виявити його можна тільки при патрулюванні територій лісниками, добровольцями або спеціально залученими людьми.

Поява вогню на ґрунтовому покриві, утвореному опадом, що розкладається, сприяє початку другого етапу розвитку лісової пожежі – попередньому нагріву і підсушуванню горючого матеріалу. Цей процес відбувається при температурі близько 120 °С і супроводжується виділенням водяного пару.

Так як лісовий відпад в радіоактивно-забрудненому лісі є опале листя і хвоя, залишки кори, відмерлі гілки і плоди, що містять радіонукліди, то в водяних парах також будуть присутні радіоактивні речовини. Підняття цих парів над кронами дерев формуватиме контрастний, в порівнянні з фоном, радіоактивний слід. Його можна зареєструвати радіаційними приладами. Виявлення слабких пульсуючих аномалій радіаційного фону радіоактивно-забрудненого лісу є першим радіаційним передвісником виникнення пожежі в лісовому масиві.

Третій етап процесу розвитку лісової пожежі – це висихання горючого матеріалу, розміщеного на ґрунтовому покриві, що містить вологу. Як правило, перегниваючий опад містить горючі смоли і кислоти. Особливо велика кількість їх в хвойних лісах. Вони підтримують процес горіння, який відбувається з виділенням водяного пару. Виділення пару з горючого матеріалу сприяє його висушуванню і, відповідно, збільшенню інтенсивності горіння, температура при цьому зростає до 260 °С.

Зростання температури горіння, з одного боку, сприяє ще більшому виділенню парів з лісового опадку, що розгорається, а з іншого – збільшенню інтенсивності висхідних повітряних потоків. В таких умовах водяні пари, що містять радіонукліди, і продукти горіння, які містять радіоактивні речовини, піднімаються на висоту, що значно перевищує висоту дерев. Вони формують стійку радіоактивну аномалію, яка контрастно виділяється на радіоактивному фоні лісу. Це другий радіаційний провісник появи пожежі в радіоактивному лісовому масиві.

Безумовно, інтенсивність і конфігурація радіоактивної аномалії буде визначатися станом нижніх шарів атмосфери, параметрами горючого матеріалу та іншими факторами, що визначають процес горіння і розвитку лісової пожежі.

Подальший розвиток лісової пожежі, а саме висихання горючого матеріалу, починає супроводжуватися не тільки виділенням водяного пару, але і горючих газів, що утворюються в опаді під час тривалого гниття. Нарешті кількість виділених газів досягає критичного обсягу, а температура їх нагрівання наближається до температури займання. Настає четвертий етап процесу розвитку лісової пожежі – займання горючих газів. Температура горіння зростає до 315-425 °С, при цьому різко зростає інтенсивність конвективних потоків. Тепер радіоактивні пари і продукти горіння піднімаються на висоту кількох сот метрів. Стійка радіоактивна аномалія, що контрастно виділяється на радіоактивному фоні лісу, розростається і набуває зональну структуру. Іншими словами, формується об'ємна радіоактивна аномалія, в якій радіоактивність значно збільшується в міру наближення від периферії до центру. З'являються локальні радіоактивні шлейфи, обумовлені нерівномірністю роз-

поділу повітряних потоків. Це третій радіаційний провісник появи пожежі в радіоактивно-забрудненому лісовому масиві.

Природний цикл розвитку лісової пожежі (без вжиття заходів щодо її гасіння) переходить до п'ятого етапу [127] – загоряння надґрунтового покриття і початок поширення горіння по площі. Починається полум'яне горіння, тобто відкрите горіння з виділенням диму, вуглекислого газу, водяного пару і незгорілих газів. Температура горіння підвищується до 650-1095 °С.

За рахунок посилення горіння лісових горючих матеріалів і подальшого підвищення температури горіння можливий перехід пожежі на вищу стадію. Відкрите полум'я сприяє різкому розширенню вогнища пожежі і появі вже не одного, а декількох, двох-трьох і більше, конвективних потоків, в результаті чого в структурі об'ємної радіоактивної аномалії з'являється кілька епіцентрів - вогнищ найбільшої радіоактивності, і додаткові радіоактивні шлейфи, при цьому радіоактивність аномалії значно збільшується. Це четвертий радіаційний провісник появи пожежі в радіоактивному лісовому масиві.

Подальший розвиток пожежі в залежності від способу розповсюдження горіння формує один з можливих видів:

- низова пожежа, коли вогонь поширюється в нижній частині стовбурів дерев;

- верхова пожежа, коли неналежно відсутності гілок внизу дерев, вогонь поширюється по їх кронах;

- підземна пожежа, коли внаслідок особливостей розташування горючих матеріалів, наприклад, торф'яних ґрунтів, вогонь поширюється під поверхневим покривом.

Лісова пожежа також буде змінюватися за інтенсивністю і швидкістю горіння. Збільшення інтенсивності горіння від слабкої буде переходити до середньої, а потім до сильної. За швидкістю горіння пожежа з побіжного перейде в стійкий, а по площі, пройденої вогнем, - з малої категорії перейде в середню, велику, а потім і особливо велику. Радіоактивні фактори при цьому обов'язково будуть присутні, але з позицій виявлення пожеж в лісових масивах, вони переходять на другий план. На цих стадіях пожежі основними методами виявлення будуть оптичні та інфрачервоні (тепловізійні) методи.

Таким чином, 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.

2.4 Фізична модель виявлення радіаційних провісників пожеж радіоактивно-забруднених лісових масивів

Фізична модель – це модель, створювана шляхом заміни об'єктів моделюючими пристроями, які імітують певні характеристики або властивості досліджуваних об'єктів. При цьому моделюючий пристрій має ту ж якісну природу, що і модельований об'єкт [128].

Фізична модель представляє собою аналогову модель, в якій між параметрами об'єкта і моделі однакової фізичної природи існує однозначна відповідність. В цьому випадку елементам системи ставляться у відповідність фізичні еквіваленти, які відтворюють структуру, основні властивості і співвідношення досліджуваного об'єкта.

При фізичному моделюванні, основою якого є теорія подібності, зберігаються особливості проведення експерименту в природі 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 [129-131]. При фізичному моделюванні, основою якого є теорія подібності, зберігаються особливості проведення експерименту в природі 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 приладобудуванні прийнято цей технічний параметр називати коефіцієнтом розпізнавання. Він є постійною величиною для даного приладу і показує, у скільки разів корисний сигнал повинен перевищувати рівень перешкоди, щоб бути достовірно виявленим. Тому для виявлення радіаційних провісників величина їх радіаційного випромінювання повинна бути рівною або більшою добутку чутливості детектора на коефіцієнт розпізнавання. Така відповідність або рівність досягається, коли пристрій, що приймає радіаційне випромінювання, знаходиться на певній висоті (певній відстані) від джерела випромінювання. Тобто при фіксованій чутливості приладу, чим більше буде інтенсивність випромінювання, тим на більшій відстані (висоті) воно буде виявлятися, і навпаки.

У разі постійної інтенсивності джерела випромінювання, чим вище буде чутливість приладу, там 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 видаленні.

Як було зазначено раніше, розвиток пожежі 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, радіаційний 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 опадів. 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 пожежної небезпеки. 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. Піднімаючись, радіоактивний пар охолоджується і починає осідати. Теплі потоки, які піднімаються з низу, передають частину свого тепла і також починають осідати. В результаті цих процесів над кронами дерев утворюється (пульсуюча) радіаційна аномалія, яка 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. На формування такої аномалії буде надавати також характер (інтенсивність) підпалу.

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 покриву, на який розвивається процес горіння. Для цієї аномалії характерно утворення ядра, розташованого в центрі конвективного висхідного потоку, і периферії, яку формують остиглі радіоактивні пари і горючі радіоактивні гази. Інтенсивність радіоактивного випромінювання аномальної області в цьому випадку також буде визначатися параметрами горючого матеріалу, перш за все його теплоємністю, і концентрацією радіоактивних речовин.

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

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 солях 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: ніж більший час горить радіоактивний пальний матеріал, тим більша кількість радіоактивних речовин виявиться в конвекційних висхідних потоках;

3) інтенсивність підпалу: ніж на більшій площі одночасно виникнуть загоряння, тим інтенсивніше розвиватиметься пожежа і охоплюватиме велику область.

Таким чином, фізична модель виявлення радіаційних провісників пожеж радіоактивно-забруднених лісових масивів 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.

РОЗДІЛ 3

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗАПОБІГАННЯ НАДЗВИЧАЙНИМ СИТУАЦІЯМ ПРИРОДНОГО І ТЕРОРИСТИЧНОГО ХАРАКТЕРУ, ВИКЛИКАНИХ ПОЖЕЖАМИ РАДІОАКТИВНО-ЗАБРУДНЕНИХ ЛІСОВИХ МАСИВІВ

Для обґрунтування математичної моделі запобігання надзвичайним ситуаціям (НС) природного і терористичного характеру, викликаним пожежами радіоактивно-забруднених лісових масивів, розглянемо хронологію розвитку подібних надзвичайних ситуацій, проаналізуємо математичні закономірності класичної теорії пошуку і сформулюємо початкові умови задачі, яка виникає при цьому. Застосувавши ряд отриманих закономірностей для пошуку радіаційних провісників пожеж в радіоактивно-забруднених лісах з використанням розвідувальних безпілотних літальних апаратів, визначимо граничні умови розв'язуваної задачі. У заданій постановці знайдемо її формалізоване рішення і опишемо отриману при цьому математичну модель запобігання надзвичайним ситуаціям природного і терористичного характеру, викликаним пожежами в радіоактивно-забруднених лісових масивах.

3.1 Хронологія розвитку надзвичайних ситуацій природного і терористичного характеру, викликаних пожежами радіоактивно-забруднених лісових масивів

Відомо [132-134], що в загальному випадку процес розвитку надзвичайних ситуацій природного, техногенного та терористичного характеру умовно розділяється на п'ять етапів:

1 етап – це щоденне і систематичне накопичення негативних факторів, що сприяють формуванню умов для виникнення аварій або катастроф, до моменту настання критичного стану;

2 етап – екстремального, понад критичної норми, накопичення негативних чинників;

3 етап – саме катастрофічна подія, що відбувається;

4 етап – ліквідація її наслідків;

5 етап – віддалені наслідки НС, що сталася.

Виходячи з наведеної вище класифікації, опис процесу розвитку надзвичайної ситуації проводиться навколо досліджуваної можливої катастрофічної події в інтересах її запобігання.

Перший етап повсякденного накопичення негативних факторів триває досить тривалий період часу. У нашому випадку це процес накопичення деревами лісу, який потрапив в зону радіоактивного зараження, радіоактивних речовин, що надходять з ґрунту, ґрунтових вод, що містять різні види радіонуклідів в результаті ядерної катастрофи (наприклад, Чорнобильської), повітряного середовища, яке переносить різні види небезпечних речовин, і радіо-

активних опадів, що випадають на лісовий масив. Все це сприяє накопиченню радіоактивних речовин, як в деревах, так і в лісовому опаду, що веде до зростання пожежної небезпеки.

Іншими словами, перший етап – це щоденне і систематичне накопичення негативних факторів, що сприяють формуванню умов для виникнення катастрофічної події у вигляді лісової пожежі, до моменту настання критичного стану.

Тут необхідно зазначити, що для районів радіоактивно-забрудненого лісу, де радіаційний фон перевищує середньостатистичний рівень, можливість виникнення пожеж вище в порівнянні з районами, де радіаційний фон нижче середньостатистичного рівня.

На схемі, що ілюструє розвиток першого етапу надзвичайної ситуації, викликаній пожежею радіоактивно-забрудненого лісу (рис. 3.1), показано, як

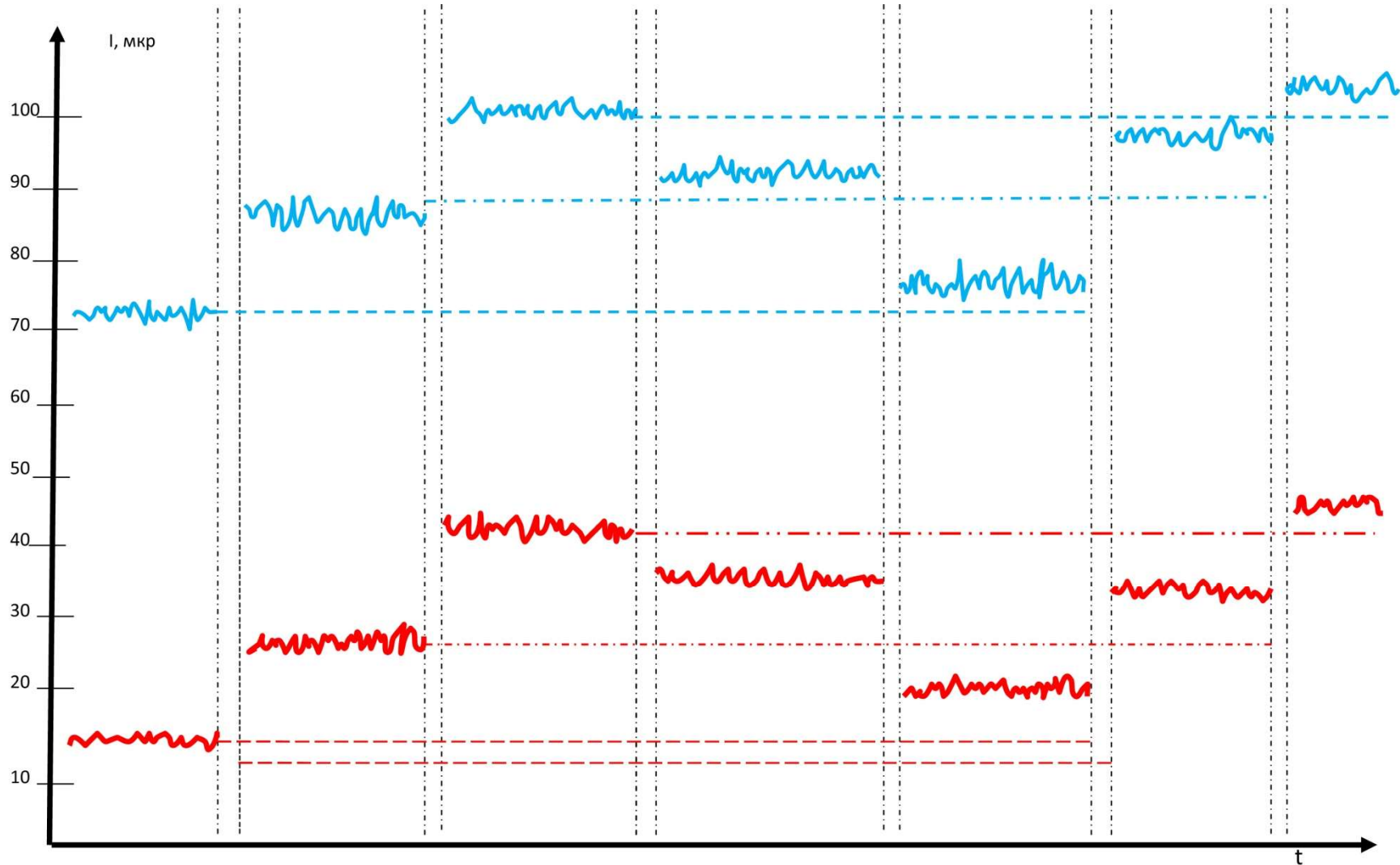


Рис. 3.1 – Зміна радіоактивного фону за минулими сезонами

змінюється радіаційний фон від одного кліматичного сезону до іншого, від попереднього року до подальшого. При цьому середньостатистичне зростання рівня радіаційного фону свідчить про накопичення радіоактивного осаду і іншого горючого матеріалу. При цьому на даному етапі радіаційний фон в місці загоряння залишається без змін, як і в усьому лісовому масиві.

На першому етапі розвитку НС, який за своєю суттю є повсякденне життя, що фактично протікає, де, з одного боку, ми виконуємо свої звичайні життєво важливі функції, а з іншого – є учасниками подій, які відбуваються навколо нас, і реагуємо на їх зміну. Наприклад, повідомляємо відповідним службам про нічне іскріння лінії електропередач, що проходить через лісовий масив, про дорожньо-транспортну пригоду або іншу подію, виявлену на підході до лісу, як то про мисливців, які займаються промислом не в сезон полювання, про туристів, розвідних вогонь в пожежонебезпечний період, та інших.

На даному етапі на перший план виступає інформаційний аспект в формі навчання, яке повинно проводитися за двома напрямками:

1) пов'язано з професійною діяльністю людини, який як фахівець певного профілю (пожежний, рятувальник, лісник) повинен знати, до чого може привести нехтування заходами безпеки в лісі або невиконання протипожежних правил, як надати першу допомогу людині, наприклад, що зламав руку, і як транспортувати туриста, що зламав ногу, як вести профілактичну попереджувальну роботу з відвідувачами лісу, як виявляти серед них неадекватних і підозрілих людей і т. п. Виконання цих елементарних, на перший погляд, банальних, обов'язкових дій і процедур дозволяє уникнути і профілакувати суб'єктивний (людський) негативний фактор;

2) пов'язано з набором «правил виживання», правил поведінки в екстремальних ситуаціях, які повинні знати всі. Ці найпростіші правила вимагають, щоб, наприклад, всі відвідувачі лісу повинні чітко знати, куди дзвонити у разі виявлення пожежі, що робити, наткнувшись на недогоріле багаття, як вести себе при зустрічі з підозрілими людьми (потенційними зловмисниками), які вживати заходи, побачивши спеціальні запалювальні засоби. Крім того, людина, як професіонал, так і відпочиваючий відвідувач лісу, також повинні бути ознайомлені з відповідною законодавчою базою, що діє в державі.

Можливо, що в силу будь-яких об'єктивних і суб'єктивних причин деякі з перерахованих заходів не виконуються, що в кінцевому підсумку призводить до накопичення повсякденного негативного фактору, яке спричиняє підвищення значення ймовірності виникнення катастрофічної події, зокрема, лісової пожежі. Ця ймовірність об'єктивно зростає або падає. Вона може усвідомлюватися чи ні, обчислюватися або якісно оцінюватися керівництвом, але коли ці коливання досягають критичного порога, в той момент відбувається перехід до другого етапу розвитку надзвичайної ситуації, викликаной пожежею радіоактивно-забрудненого лісового масиву. Він визначається як перехід безпосередньо до екстремальної ситуації. Його ще називають етапом екстремального накопичення негативних факторів або екстремального розвитку ситуації.

Суть другого етапу розвитку НС полягає в тому, що безліч факторів, що описують стан техногенного або природного об'єкта, характеризує зростання

ризикую виникнення надзвичайної ситуації. Це означає, що процес рівноважного стану фактично вийшов з-під контролю, при цьому відбувається екстремальне, понад критичної норми, накопичення негативних факторів.

Етап екстремального накопичення негативного фактора в нашому випадку відповідає першому етапу розвитку лісової пожежі, тобто займанню або появи неконтрольованого джерела вогню, що може бути викликано діяльністю людини або природним явищем. У першому випадку, якщо підпал вчинене однією людиною або групою людей за попередньою змовою, то НС буде носити терористичний характер. У другому, якщо вона сталася внаслідок удару блискавки, падіння небесного тіла (наприклад, метеорита) і т. п., то НС буде носити природний характер.

Наступ другого етапу розвитку надзвичайної ситуації, викликаної пожежею радіоактивно-забрудненого лісового масиву, об'єктивно, але його необхідно виявити або виявити ознаки його настання, усвідомити і почати діяти.

Ще раз відзначимо, що поява невеликого відкритого вогню відноситься до першого етапу розвитку загоряння, при цьому не змінюється ні радіаційний, ні тепловий фон, зміни якого можна зафіксувати приладами, розміщеними на авіаційних або космічних носіях.

На цьому етапі розвитку НС, викликаної пожежею радіоактивно-забрудненого лісу, можливо п'ять типових сценаріїв розвитку подій.

Перший сценарій – сприятливий, коли починає розвиватися екстремальна ситуація, але вжитими заходами всі передумови можливих аварій і катастроф оперативно ліквідовуються в найкоротший проміжок часу, при цьому вся система (підприємство або природний об'єкт, в нашому випадку лісовий масив) повертається в початковий стан, де по-колишньому відбуваються різні процеси накопичення повсякденних негативних факторів.

Цьому сценарію може відповідати другий етап розвитку лісової пожежі, коли відбувається попереднє нагрівання і підсушування горючого матеріалу з виділенням водяної пари, що формує перший радіаційний провісник появи пожежі в радіоактивно-забрудненому лісі – підняття радіоактивних парів, що утворюються при загорянні, над кронами дерев і формування контрастної в порівнянні із загальним фоном радіоактивної точкової області – слабкої пульсуючої радіаційної аномалії. Вона може бути виявлена з пілотованих та безпілотних авіаційних засобів і, відповідно, забезпечити своєчасне прийняття рішення на залучення пожежних патрулів чи інших, порівняно невеликих, сил і засобів, необхідних для ліквідації джерела загоряння.

Другий сценарій розвитку НС, викликаної пожежею радіоактивно-забрудненого лісового масиву, носить назву оперативного. Він полягає в тому, що вжитими заходами ризик (ймовірність аварії) або катастрофічної події залишається досить високий, але ситуація знаходиться під контролем, проте початкові причини залишаються не усунутими. Вони зберігаються тривалий час в силу складності або тривалості їх нейтралізації.

Такому сценарію може відповідати третій етап розвитку лісової пожежі, коли відбувається висихання горючого матеріалу і його горіння з виділенням горючих речовин, при цьому формується другий радіаційний провісник появи

пожежі в радіоактивно-забрудненому лісовому масиві – утворення стійкої радіоактивної аномалії, яка контрастно виділяється на загальному радіоактивному фоні лісу в порівнянні зі слабкою пульсуючою радіаційною аномалією.

Для такої аномалії характерно утворення ядра, розташованого в центрі конвекційного висхідного потоку, і периферії, яку утворюють остиглі радіоактивні пари і горючі радіоактивні гази. Інтенсивність радіоактивного випромінювання аномальної області, яка виникла, буде визначатися параметрами горючого матеріалу, в першу чергу, його теплоємністю, і концентрацією радіоактивних речовин в його складі. Інтенсивність радіоактивності аномалії також буде залежати від часу і інтенсивності (швидкості) горіння горючого матеріалу, які визначають характеристики конвекційних потоків. На формування аномалії впливає також характер (інтенсивність) підпалу: чим більше площа одночасних загорянь, тим інтенсивніше розвивається пожежа і охоплює велику область. Така аномалія може бути своєчасно виявлена з пілотованих та безпілотних авіаційних засобів, що дозволяє забезпечити оперативне прийняття рішення на залучення необхідних сил і засобів для ліквідації загоряння, що розвивається.

Третій варіант сценарію розвитку НС, викликаной пожежею радіоактивно-забрудненого лісового масиву, називають умовно «балансуванням на межі». Про це говорять іноді, як про диво, про щось фантастичне, неможливе. Фактично відбувається те, що комплексом вжитих заходів, зусиль, дій і т. п., аварії чи іншої катастрофічної події вдається уникнути. Подальшими діями ситуація зводиться до другого, а потім до першого сценарію. В результаті виходить сценарій «балансування на межі» з позитивним результатом. Йому може відповідати четвертий етап розвитку лісової пожежі, коли відбувається займання газів, і формується третій радіаційний провісник появи пожежі в радіоактивному лісовому масиві. При цьому 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, які обумовлені рухом повітряних мас. Інтенсивність радіоактивного випромінювання об'ємної аномалії зростає, що викликано збільшенням температури горіння. Така аномалія упевнено виявляється з пілотованих та безпілотних авіаційних засобів і може бути своєчасно виявлена космічними засобами по радіаційним і інфрачервоним каналам. Своєчасно отримана інформація дозволяє керівництву прийняти рішення на організацію і розгортання необхідних сил і засобів для ліквідації пожежі, що починається в радіоактивно-забрудненому лісовому масиві.

Четвертий варіант сценарію розвитку НС, викликаной пожежею радіоактивно-забрудненого лісового масиву, коли балансуванням на межі не вдається стримати ситуацію, і катастрофічна подія все-таки наступає – лісова пожежа переходить в активну фазу, яка розвивається і стрімко охоплює всі великі площі. Такий сценарій називають «балансуванням на межі» з негативним результатом. Йому можна поставити у відповідність п'ятий етап розвитку лісової пожежі, коли починається полум'яне горіння з виділенням диму, вуглекислого газу, водяної пари і незгорілих газів, коли формується четвертий радіаційний провісник появи пожежі в радіоактивно-забрудненому лісі. Відбувається розвиток

(трансформація) об'ємної радіоактивної аномалії, поява в її структурі декількох епіцентрів – вогнищ найбільшої радіоактивності, а також додаткових радіоактивних шлейфів, спостерігається значне зростання радіоактивності аномалії. Вона також упевнено виявляється з пілотованих та безпілотних авіаційних засобів і може бути своєчасно виявлена космічними засобами по радіаційним і інфрачервоним каналам. Отримана таким чином інформація дозволяє керівництву прийняти рішення щодо організації і розгортання необхідних сил і засобів для ліквідації пожежі, яка починається в радіоактивно-забрудненому лісовому масиві, а також мобілізацію додаткових сил і засобів в інтересах взяття надзвичайної ситуації під контроль.

П'ятий варіант сценарію розвитку НС, викликаній пожежею радіоактивно-забрудненого лісового масиву, називають невідворотним, коли лавиноподібний розвиток події такий, що надзвичайна подія вже неминуча. Інтервал часу, який залишається до настання катастрофічної події, можна використовувати для мінімізації майбутніх наслідків. Наприклад, в результаті умисно організованого підпалу (диверсії) пожежа охоплює величезну територію за короткий проміжок часу. Він стійко фіксується космічними засобами не тільки по радіаційним і тепловим, але і оптоелектронним (телевізійним) каналам. На організацію гасіння пожежі не вистачає сил і засобів, тому в першу чергу необхідна евакуація для порятунку людей. Схеми описаних вище сценаріїв представлені на рис. 3.2.

Другий етап розвитку надзвичайної ситуації в інформаційному плані більш складний. З одного боку, законодавчі акти держави Україна вимагають інформувати громадян про всі фактори, які впливають на їхнє життя і здоров'я. З іншого боку, неправильно подана інформація може викликати паніку серед населення. Наприклад, будь-яка інформація з ядерного об'єкта, якими є атомні електростанції, про нестандартну ситуацію викликає у громадян реакцію, яку тепер називають Чорнобильським синдромом або фактором Фокусіми. Тут необхідно зазначити таку інформаційну характеристику, як її цілісність. Якщо висвітлювати розвиток надзвичайної ситуації не в повному обсязі, як вона розвивалася, і небезпеки вже немає, а тільки висмикувати окремі факти з контексту, то таке інформування населення може стати джерелом нових надзвичайних ситуацій, які будуть проявлятися в масовому від'їзді громадян або скупкою продуктів, які довго зберігаються, і т. п.

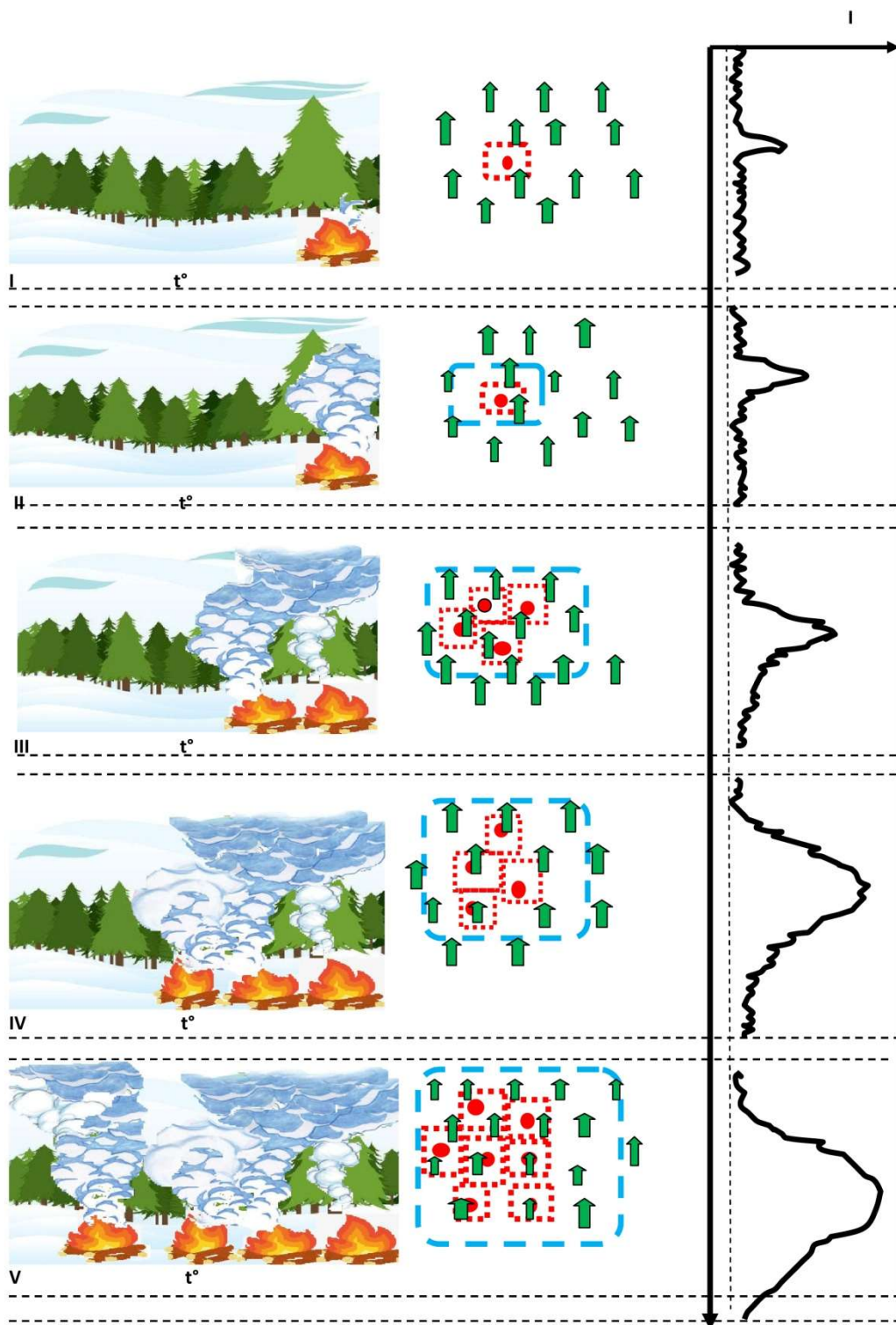


Рис. 3.2 – Схеми сценаріїв розвитку другого етапу НС

Особливе питання, коли ситуація розвивається за відносно сприятливому (другому або третьому) сценарієм. Залучення додаткових сил і засобів дозволяє тримати все під контролем, але будь-яка інформація, що потрапила в руки некомпетентних людей, може призвести до негативних наслідків серед населення. У зв'язку з цим весь інформаційний обмін повинен бути конфіденційним. Це ві-

дноється і до інформації про розвиток НС, до інформації, використовуваної в технологічних процесах, а також до інформації, що надходить до підрозділів, що взаємодіють і надають допомогу в інтересах запобігання екстремальній обстановки.

Третій етап розвитку НС, викликаній пожежею радіоактивно-забрудненого лісового масиву, об'єктивно вважати саму пожежу, яка може тривати досить тривалий час: від кількох годин до кількох тижнів. З моменту його початку вона проходить фази розвитку, апогею, загасання і припинення.

Четвертий етап розвитку НС, викликаній пожежею радіоактивно-забрудненого лісового масиву, – це ліквідація наслідків катастрофічної події, яка характеризується ступенем зниження очікуваного збитку.

П'ятий етап розвитку надзвичайної ситуації, викликаній пожежею радіоактивно-забрудненого лісу, – віддалені наслідки, які можуть проявлятися через десятки місяців або через десятки років (наприклад, як у дітей, батьки яких брали участь в ліквідації наслідків Чорнобильської катастрофи).

Таким чином, перебіг і розвиток надзвичайної ситуації, викликаній пожежею радіоактивно-забрудненого лісового масиву, як просторово-часового процесу, умовно розділяється на п'ять етапів: повсякденного накопичення негативних факторів, екстремального їх розвитку, саме катастрофічна подія – пожежа в радіоактивно-забрудненому лісі, ліквідація її наслідків і віддалені наслідки катастрофічної події. Другий етап протікання надзвичайної ситуації характеризується появою відкритого вогню, і розвиток процесу загоряння радіоактивно-забрудненого лісового масиву може відбуватися по одному з п'яти типових сценаріїв, кожному з яких відповідає певний радіоактивний провісник, реєстрований приладами, розміщеними на авіаційних і космічних носіях.

3.2. Математичні закономірності класичної теорії пошуку і постановка початкових умов задачі

Розглянемо математичні закономірності, що становлять основу класичної математичної дисципліни – теорії пошуку, і визначимо початкові умови вирішення задачі пошуку об'єктів – радіаційних провісників пожеж в радіоактивно-забруднених лісових масивах [135-138], для чого сформулюємо задачу пошуку об'єктів в загальному вигляді, дамо характеристику умов задачі пошуку нерухомій цілі і зупинимося на критерії вибору оптимальної стратегії пошуку нерухомій цілі.

3.2.1 Формулювання спільної задачі пошуку об'єктів

Пошук – це процес послідовних операцій, спрямованих на збір, обробку та надання інформації про місцезнаходження цілі або об'єкта пошуку.

Задача пошуку виникає, коли потрібно визначити положення об'єкта, що знаходиться в заданій області Ω n -мірного евклідового простору R^n , за допомогою пошукових одиниць або пошукового обладнання, у яких здатності до

виявлення недосконалі, тобто вимагають залучення людини-оператора пошукової системи.

Положення цілі або об'єкта пошуку задається за допомогою деякої щільності розподілу. Якщо ціль нерухома, то щільність розподілу не залежить від часу і має вигляд $u(x)$, где $x \in \Omega$. Якщо щільність розподілу залежить від часу, то вона має вигляд $u(x,t)$, где $x \in \Omega$ и $t \geq 0$.

Розглянемо дві ситуації, перша з яких має вигляд функції і визначається характером руху цілі, а в другій – ця функція безпосередньо задовольняє деякому рівнянню.

Прикладом першого випадку може бути судно, що дрейфує в морі. Якщо відомі щільність розподілу його положення в початковій точці дрейфу, статистика вітру і морських течій, то щільність розподілу при $t > 0$ може бути отримана стандартними методами теорії ймовірностей.

У другому випадку рівняння, якому задовольняє функція $u(x,t)$, буде рівнянням еволюційного типу:

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = Au(x,t),$$

де функція $u(x,0) = u(x)$ задана. Зазвичай вважається, що це рівняння має єдине рішення, яке задовольняє заданому початковому умові.

Закон виявлення, відповідно до якого описується пошук і вирішується задача виявлення об'єкта системою виявлення, складний і залежить від багатьох факторів. В процесі пошуку пошукова одиниця (система пошуку) направляє задані кількості пошукових зусиль в різні точки x області Ω протягом певного проміжку часу – періоду пошуку.

Якщо пошукове зусилля в точці x позначити $\varphi(x)$, то ймовірність виявлення цілі буде залежати від $\varphi(x)$, а, в загальному випадку, також від точки x – координат розташування об'єкта пошуку. Тобто, якщо ціль дійсно знаходиться в точці x , то ймовірність виявлення дорівнюватиме $q(x, \varphi(x))$.

Тут функція $q(x, \varphi)$ володіє певними типовими властивостями:

1) якщо пошуку не має, то і $\varphi(x) \equiv 0$, то і ціль не може бути виявлена, значить, $q(x,0) = 0$ для всіх;

2) якщо функція $q(x, \varphi)$ – деяка ймовірність, то $0 \leq q(x, \varphi) \leq 1$ для всіх пошукових зусиль $\varphi(x)$;

3) $q(x, \varphi)$ – зростаюча функція від φ при всіх $x \in \Omega$, так як зростання $\varphi(x)$ збільшує ймовірність виявлення;

4) існує $\lim_{\varphi \rightarrow \infty} q(x, \varphi) = q_{\infty}(x)$, де $q_{\infty}(x) \leq 1$ для всіх $x \in \Omega$.

Практично визначити функції $\varphi(x)$ і $q(x, \varphi)$ – досить трудомістке завдання. Для цього потрібно докладна інформація про систему пошуку і характер області Ω . Якщо, наприклад, основним знаряддям пошуку є людське око, пот-

рібно провести детальний аналіз всієї зорової (оптичної) системи. На практиці доводиться вибрати деяку наближену (апроксимовану, відповідну, що враховує основні властивості об'єкта і пошукової системи) функцію $q(x, \varphi)$, яка відображатиме основні особливості ситуації пошуку. Зазвичай вибирають функцію

$$q(x, \varphi) = 1 - e^{-\varphi}.$$

У разі, коли в якості пошукового зусилля вибирається деяка функція $\varphi(x)$, можна допустити, що знайдеться деяка функція $\lambda(x, t)$, задовольняюча умову:

$$\varphi(x) = \int_0^T \lambda(x, t) dt,$$

де T – час, відпущений на пошук [139-141].

Функція $\lambda(x, t)$ називається функцією щільності пошуку або стратегією пошуку. Зазвичай вона передбачається такою, що $\lambda(x, t) \geq 0$ для всіх $x \in \Omega$, $t \geq 0$, и

$$\int_{\Omega} \lambda(x, t) dx = L(t) \text{ для всіх } t \geq 0.$$

Стратегія пошуку, що задає програму пошуку, залежить від структури і динамічної поведінки пошукової системи.

Якщо пошукове зусилля $\varphi(x)$, функція $q(x, \varphi)$ і щільність розподілу цілі $u(x)$ задані, то ймовірність виявлення цілі за час T виражається у вигляді:

$$P(T) = \int_{\Omega} q(x, \varphi(x)) u(x) dx.$$

Отримали цільової функціонал пошукової задачі. Після того, як він заданий, необхідно знайти пошукове зусилля $\varphi(x)$, що задовольняє двом обмеженням:

$$\varphi(x) \geq 0 \text{ для } x \in \Omega,$$

$$\int_{\Omega} \varphi(x) dx = C,$$

де C – задана постійна.

Якщо щільність розподілу положення цілі має вигляд $u(x, t)$, то завдання стає значно складніше. У цьому випадку залежність $u(x, t)$ від часу задається за допомогою диференціального рівняння [142]. Тому ці та інші особливості задач

теорії пошуку привели до того, що теорія пошуку вважається самостійною математичною дисципліною, як і теорія надійності, теорія статистичних рішень, теорія черг і інші. Спільною рисою математичного трактування задач пошуку є те, що відомі класичні методи виявляються для їх вирішення недостатньо ефективними. Навіть в разі пошуку нерухомій цілі вже потрібні загальні оптимізаційні теорії, а рівняння еволюційного типу, згадане вище, має розглядатися в рамках теорії узагальнених функцій.

3.2.2 Характеристика умов, які забезпечують вирішення задачі пошуку нерухомій цілі

У нашому випадку об'єктом пошуку є пожежа радіоактивного лісового масиву, а точніше радіаційний ознака загоряння, який утворюється внаслідок підняття конвекційними потоками радіоактивних аерозолів, пари та продуктів горіння над кронами дерев. Джерело загоряння нерухомий. Радіоактивна аномалія, що утворюється над ним, має нерухомий початок і розмитий хвіст, що обумовлюється рухом повітряних мас в нижніх шарах атмосфери. Саме цей об'єкт – радіоактивну аномалію, шукає безпілотний летальний апарат, обладнаний відповідною системою виявлення – радіаційним приладом. Результатом виявлення є місце розташування джерела загоряння, яке характеризується двома координатами: широтою і довготою. Це відповідає припущенню про те, що ціль (об'єкт пошуку) знаходиться в нерухомому стані в заданій відкритій області Ω двовимірного простору R^2 . Положення цілі задається за допомогою щільності розподілу $u(x)$, яка є безперервною.

Що стосується системи пошуку, то будемо вважати її комплексної, складовою, великий, структурованої і т. п. У різних джерелах використовуються різні назви, але суть цих пошукових систем від цього не змінюється. Вона полягає в тому, що для пошуку об'єкта, в нашому випадку, вогнища загоряння в радіоактивно-забрудненому лісовому масиві, можуть використовуватися як одна, так і декілька пошукових одиниць – безпілотних літальних апаратів. Вони можуть бути однотипними або різних класів, використовуватися одночасно або послідовно. Крім того, можуть використовуватися безпілотні, пілотовані і космічні літальні апарати. Кожен з них може бути обладнаний як одним каналом виявлення (радіаційним, інфрачервоним або тепловим, оптоелектронним або телевізійним), так двома або більше.

Нехай для даної пошукової системи дії окремих пошукових одиниць можна представити за допомогою однієї функції $\lambda(x, t)$ – стратегії пошуку, яка має такі властивості:

$$1) \lambda(x, t) \geq 0 \text{ для всіх } x \in \Omega, t > 0; \quad (3.1)$$

$$2) \int_{\Omega} \lambda(x, t) dx = L(t) \text{ для всіх } t > 0; \quad (3.2)$$

$$3) \lambda(x, t) \Delta t + o(\Delta t), \quad (3.3)$$

і є ймовірністю виявлення цілі в інтервалі часу $(t, t + \Delta t)$ за умови, що ціль знаходиться в точці x і не виявлена до моменту t .

Функція $L(t)$ при цьому передбачається кусочно-безперервною при $t > 0$.

Прикладом пошукової системи, яка не є комплексною, складовою, великою, структурованою, може служити окрема пошукова одиниця, наприклад, одиночний літальний апарат, який обладнаний одним каналом виявлення.

Основної змінної в нашому випадку буде щільність апостеріорного розподілу положення цілі $u(x, t)$, яка визначена для $x \in \Omega$ и $t > 0$.

Об'єкт пошуку – джерело загоряння, нерухомий, але вплив процесу пошуку безперервно змінює щільність його розподілу. В області лісового радіоактивно-забрудненого масиву, де був проведений ретельний пошук протягом часу $(0, t)$, цілі в момент t , швидше за все, не буде.

Отримаємо співвідношення між $u(x)$ – щільністю розподілу цілі (її розташування), $u(x, t)$ – щільністю розподілу цілі (щільністю апостеріорного розподілу положення цілі), коли вона залежить від часу, і $\lambda(x, t)$ – функцією, 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 .

Припустимо, що, по-перше, ціль знаходиться в малій околиці Δx , яка містить точку, а по-друге, ціль не виявлена за час (t_1, t_2) , тоді отримаємо, що

$$u(x)\Delta x = P\{(x)\} \quad (3.4)$$

і

$$u(x, t)\Delta x = P\{(x)/(0, t)\} = \frac{P\{(x)(0, t)\}}{P\{(0, t)\}}. \quad (3.5)$$

В такому випадку

$$\begin{aligned} u(x, t + \Delta t)\Delta x &= \frac{P\{(x)(0, t + \Delta t)\}}{P\{(0, t + \Delta t)\}} = \frac{P\{(x)(0, t)(t, t + \Delta t)\}}{P\{(0, t)(t, t + \Delta t)\}} = \\ &= \left(\frac{P\{(x)(0, t)\}}{P\{(0, t)\}} \right) \frac{P\{t, t + \Delta t)/(x)(0, t)\}}{P\{(t, t + \Delta t)/(0, t)\}}. \end{aligned} \quad (3.6)$$

З визначення функції щільності пошуку $\lambda(x, t)$, яку також називають стратегією пошуку, слідує, що

$$P\{(t, t + \Delta t)/(x)(0, t)\} = 1 - \lambda(x, t)\Delta t + o(\Delta t). \quad (3.7)$$

Інтегруючи (3.7) по x , отримаємо:

$$P\{(t, t + \Delta t) / (0, t)\} = 1 - \Delta t \int_{\Omega} \lambda(x, t) u(x, t) dx + o(\Delta t). \quad (3.8)$$

Сенс виразів:

$\lambda(x, t)\Delta t$ – ймовірність виявлення цілі в інтервалі часу $(t, t + \Delta t)$ за умови, що вона перебуває в точці x і не виявлена за час $(0, t)$;

$u(x, t)\Delta x$ – ймовірність того, що в момент часу t ціль знаходиться в околиці Δx точки x , за умови, що вона не виявлена за час $(0, t)$.

Із (3.8) отримаємо, що

$$P\{(0, t)\} = \exp\left\{-\int_0^t d\tau \int_{\Omega} \lambda(x, \tau) u(x, \tau) dx\right\}. \quad (3.9)$$

Відповідно до (3.5) - (3.6) і (3.8) маємо:

$$\begin{aligned} u(x, t + \Delta t)\Delta x &= \frac{u(x, t)\Delta x(1 - \lambda(x, t)\Delta t + o(\Delta t))}{1 - \Delta t \int_{\Omega} \lambda(x, t) u(x, t) dx + o(\Delta t)} \\ &= u(x, t) \left[1 - \Delta t \left(\lambda(x, t) - \int_{\Omega} \lambda(x, t) u(x, t) dx \right) \right] + o(\Delta t) \end{aligned} \quad (3.10)$$

Після нескладних перетворень, отримуємо

$$u_t(x, t) = - \left[\lambda(x, t) - \int_{\Omega} \lambda(x, t) u(x, t) dx \right], \quad x \in \Omega, \quad t > 0. \quad (3.11)$$

де $u_t(x, t)$ – приватна похідна по змінній t .

Нехай функція щільності пошуку $\lambda(x, t)$ задана. Апостеріорна щільність розподілу положення цілі знаходиться шляхом рішення задачі Коші рівняння (3.11) з початковою умовою:

$$u(x, 0) = u(x). \quad (3.12)$$

Рівняння (3.11) нелінійно по відношенню до щільності розподілу, і його інтегрування виявляється досить складним. Спростити завдання можна, звівши її до лінійного рівняння. Підставивши

$$u(x, t) = y(x, t) \exp\left(\int_0^t d\tau \int_{\Omega} \lambda(x, \tau) u(x, \tau) dx\right) \quad (3.13)$$

в (3.11) і (3.12), отримаємо таку задачу:

$$y_\tau(x, t) = -\lambda(x, t)y(x, t), \quad (3.14)$$

$$y(x, 0) = u(x), \quad (3.15)$$

де $x \in \Omega$, і $t > 0$.

Рішення рівняння (3.14), що задовольняє умові (3.15), набуде вигляду:

$$y(x, t) = u(x) \exp\left(-\int_0^t \lambda(x, \tau) d\tau\right), \quad (3.16)$$

і має простий і наочний сенс, тобто $y(x, t)$ – ймовірність того, що ціль знаходиться в x і не виявлена до моменту t .

Щоб отримати вираз для щільності розподілу помножимо обидві частини (3.16) на $\lambda(x, t)$ і проінтегруємо за областю Ω :

$$\int_{\Omega} \lambda(x, t) u(x, t) dx = \left(\int_{\Omega} \lambda(x, t) y(x, t) dx \right) \exp\left(\int_0^t d\tau \int_{\Omega} \lambda(x, \tau) u(x, \tau) dx\right), \quad (3.17)$$

що можна переписати у вигляді:

$$\left(\frac{d}{d\tau}\right) \exp\left(-\int_0^t d\tau \int_{\Omega} \lambda(x, \tau) u(x, \tau) dx\right) = -\int_{\Omega} \lambda(x, \tau) y(x, \tau) dx, \quad (3.18)$$

звідки

$$\exp\left(-\int_0^t d\tau \int_{\Omega} \lambda(x, \tau) u(x, \tau) dx\right) = 1 - \int_0^t d\tau \int_{\Omega} \lambda(x, \tau) y(x, \tau) dx, \quad (3.19)$$

і (3.16) переходить в

$$u(x, t) = y(x, t) \left[1 - \int_0^t d\tau \int_{\Omega} \lambda(x, \tau) y(x, \tau) dx \right]^{-1}. \quad (3.20)$$

Так як $\int_{\Omega} u(x, \tau) dx = 1$ для всіх $t \geq 0$, то із (3.13) і (3.19) виходить, що

$$\int_{\Omega} y(x, \tau) dx = 1 - \int_0^t d\tau \int_{\Omega} \lambda(x, \tau) y(x, \tau) dx, \quad (3.21)$$

тому (3.20) можна записати в наступному вигляді:

$$u(x, t) = y(x, t) \left[\int_{\Omega} y(x, \tau) dx \right]^{-1}. \quad (3.22)$$

З (3.16) і (3.22) випливає, що

$$u(x, t) = u(x) \exp \left(- \int_0^t \lambda(x, \tau) d\tau \right) \left[\int_{\Omega} u(x) \exp \left(- \int_0^t \lambda(x, \tau) d\tau \right) dx \right]^{-1}. \quad (3.23)$$

Згідно (3.9) і (3.13) $P\{(0, t)\} u(x, t) = y(x, t)$. Інтегруючи його по x і враховуючи (3.16) і умову, що $\int_{\Omega} u(x, t) dx = 1$, отримуємо:

$$P\{(0, t)\} = \int_{\Omega} u(x) \exp \left(- \int_0^t \lambda(x, \tau) d\tau \right) dx. \quad (3.24)$$

Нехай тепер $P(t)$ – ймовірність того, що ціль виявлена протягом часу $(0, t)$, тобто $P(t) = 1 - P\{(0, t)\}$, тоді з (3.24) випливає, що

$$P(T) = 1 - \int_{\Omega} u(x) \exp \left(- \int_0^T \lambda(x, \tau) d\tau \right) dx \quad (3.25)$$

Вираз (3.25) визначає ймовірність виявлення цілі протягом заданого часу $(0, T)$. Вона буде максимальною, якщо стратегія пошуку, тобто функція $\lambda(x, t)$, буде визначається умовами (3.1) - (3.3).

Введемо позначення

$$\varphi(x, T) = \int_0^T \lambda(x, \tau) d\tau, \quad (3.26)$$

тоді (3.25) набуде вигляду:

$$P(T) = 1 - \int_{\Omega} u(x) \exp(-\varphi(x, T)) dx, \quad (3.27)$$

а умови (3.1)-(3.2) замінюються умовами:

$$\varphi(x, T) \geq 0 \text{ для всіх } x \in \Omega, \quad (3.28)$$

$$\int_{\Omega} \varphi(x, T) dx = \int_0^T L(\tau) d\tau. \quad (3.29)$$

З (3.26) випливає, що функція $\varphi(x, T)$ представляє кількість пошукових зусиль, витрачених в точці x на протязі часу $(0, T)$. В основі функції (3.27) лежить стратегія пошуку $\lambda(x, t)$, обумовлена (3.3).

Нехай пошукове зусилля $\varphi(x, t)$ визначається умовами (3.28)-(3.29), і існує функція $\Pi(\varphi)$, яка має експериментальне походження і має такі властивості: $\Pi(0) = 0$, $\Pi'(\varphi) \geq 0$ для всіх $\varphi > 0$ і $\Pi(\varphi) \rightarrow \beta$, де $\beta \leq 1$, коли $\varphi \rightarrow \infty$.

Функції $\Pi(\varphi(x, T))$ – ймовірність виявлення цілі за допомогою пошукового зусилля $\varphi(x, T)$, коли ціль справді перебуває в точці x .

Ціль обов'язково виявляється, коли пошукове зусилля $\varphi(x, T)$ зростає до нескінченності, тобто $\beta = 1$.

Ймовірність виявлення цілі протягом часу $(0, T)$ задається виразом

$$P(t) = \int_{\Omega} u(x) \Pi(\varphi(x, T)) dx. \quad (3.30)$$

Якщо вибрати $\Pi(\varphi) = 1 - \exp(-\varphi)$, то (3.30) приймаємо вигляд (3.27).

Задача максимізації виразу (3.30) на заданому інтервалі часу T , заданою функцією $\varphi(x, T)$, що задовольняє умовам (3.28)-(3.29), в загальному випадку була вирішена Аркиним [139]. Він показав, що маючи пошукове зусилля $\varphi(x, T)$, отримане в результаті рішення задачі оптимізації, можна знайти функцію $\alpha(x, t)$, задовольняючу умовам:

$$\alpha(x, t) \geq 0, \int_{\Omega} \alpha(x, t) dx = 1 \quad \text{при} \quad \int_0^T L(T) d\tau = T,$$

така, що

$$\int_0^T \alpha(x, t) dt = \varphi(x, T) \quad (3.31)$$

для всіх $x \in \Omega$.

Також існує функція $\alpha^*(x, t)$, звана рівномірно оптимальною стратегією пошуку, з такою спеціальною властивістю, що

$$\varphi(x, t) = \int_u^t \alpha(x, \tau) d\tau,$$

яка є оптимальною для всіх $t > 0$.

Отже, постановка задачі пошуку нерухомій цілі зводиться до задачі оптимізації цільового функціоналу (3.30) при умовах (3.28)-(3.29), які відносяться до випадку, коли розташування цілі залишається незмінним протягом усьо-

го часу виконання завдання пошуку джерела загоряння радіоактивного лісового масиву.

3.2.3 Критерії вибору оптимальної стратегії пошуку нерухомій цілі

Щоб визначити критерії оптимальної стратегії пошуку джерела загоряння в радіоактивно-забрудненому лісовому масиві як нерухомого об'єкта пошуку, необхідно вирішити задачу оптимізації пошуку комплексною системою пошуку. З виразу (3.9) для ймовірності того, що ціль не буде виявлена протягом часу $(0, t)$, з рахунком (3.21) запишемо такі вирази в термінах функцій $y(x, t)$ і $\lambda(x, t)$ для ймовірності невиявлення об'єкту пошуку $Q(t) = 1 - P(t)$:

$$Q(t) = 1 - \int_0^t d\tau \int_{\Omega} \lambda(x, \tau) y(x, \tau) dx, \quad (3.32)$$

$$Q(t) = \int_{\Omega} y(x, t) dx. \quad (3.33)$$

Обидва вирази є однією і тією ж функцією часу. Вираз (3.33) будемо використовувати далі в якості цільового функціоналу. З його допомогою необхідно вирішити оптимізаційну задачу, яка записується в наступному вигляді

$$\int_{\Omega} y(x, T) dx \rightarrow \min, \quad (3.34)$$

$$y_t(x, t) = -\lambda(x, t) y(x, t), \quad x \in \Omega, t > 0, \quad (3.35)$$

$$\lambda(x, t) \geq 0, \quad x \in \Omega, t > 0, \quad (3.36)$$

$$\int_{\Omega} \lambda(x, t) dx = L(t), \quad t > 0, \quad (3.37)$$

$$y(x, 0) = u(x), \quad (3.38)$$

де $L(t)$ – задана функція.

Розглянемо характер розглянутих функцій. Рівномірно оптимальна стратегія пошуку має наступну властивість.

Існує область $\Omega_+(t) \subset \Omega$, яка збільшується з часом, така, що стратегія пошуку позитивна всередині області $\Omega_+(t)$ і рівна нулю в $\Omega \setminus \Omega_+(t)$. Крім цього, стратегія пошуку є функцією тільки часу.

Будемо вважати, що стратегія пошуку $\lambda(x, t)$ задовольняє таким умовам:

$$\begin{aligned}\lambda(x,t) &> 0 \quad \text{для} \quad x \in \Omega_+(t), \\ \lambda(x,t) &= 0 \quad \text{для} \quad x \in \Omega \setminus \Omega_+(t),\end{aligned}\tag{3.39}$$

де $m(\Omega_+(t))$ – міра множини $\Omega_+(t)$, яка є неубиваючою функцією часу, оскільки стратегія пошуку $\lambda(x,t)$ поширюється протягом усього часу пошуку. Тому для кожного $x \in \Omega$ існує момент часу $t(x)$, такий, що

$$\begin{aligned}\lambda(x,t) &> 0 \quad \text{для} \quad t \in [t(x), T], \\ \lambda(x,t) &= 0 \quad \text{для} \quad t \in [0, t(x)].\end{aligned}\tag{3.40}$$

Характер функції $t(x)$ важко встановити заздалегідь.

Нехай функція $t(x)$ неперервна в області Ω . Властивості (3.40) повинні виходити в результаті оптимізації, тобто рішення задачі (3.34)-(3.37) буде володіти цими якостями, так як вони не можуть бути накладені на рішення заздалегідь. Тепер з (3.12), (3.35), (3.38) і (3.40) відразу випливає, що

$$y(x,t) = u(x) \exp\left(-\int_{t(x)}^t \lambda(x,\tau) d\tau\right).\tag{3.41}$$

Очевидно, що $y(x,t)$ буде безперервною функцією від t , якщо стратегія пошуку $\lambda(x,t)$ є кусочно-безперервною функцією від x і t в області $\Omega \times (0, T)$.

В теорії оптимального управління функція стану, в даному випадку функція $y(x,t)$, повинна бути безперервною по x і t в області $\Omega \times (0, T)$, тому будемо вимагати, щоб функція $u(x)$ в початковій умові $y(x,0) = u(x)$ була безперервною функцією від $x \in \Omega$.

Отримаємо умову оптимальності на основі методу Єгорова [142], для чого скористаємося терміном умови оптимальності, розуміючи під цим необхідні умови оптимальності, а при вирішенні деяких задач будемо застосовувати необхідні умови в якості достатніх.

Нехай тепер $y(x,t)$ задовольняє умові (3.35) в $\Omega \times (0, T)$, причому $y(x,t)$ – кусочно-безперервна функція, а $\psi(x,t)$ – довільна функція, диференційована по x і t в $\Omega \times (0, T)$, тоді маємо тотожність:

$$\int_0^T dt \int_{\Omega} \psi(y_t + \lambda y) dx = 0.\tag{3.42}$$

Його можна переписати в наступному вигляді:

$$\begin{aligned}
0 &= \int_0^T dt \int_{\Omega} \psi(y_t + \lambda y) dx = \int_0^T dt \int_{\Omega} [(\psi y)_t - \psi_t y + \lambda \psi y] dx = \\
&= \int_0^T dt \frac{d}{dt} \int_{\Omega} \psi y dx + \int_0^T dt \int_{\Omega} (-\psi_t + \lambda \psi) y dx = \\
&= \int_{\Omega} \psi(x, T) y(x, T) dx - \int_{\Omega} \psi(x, 0) y(x, 0) dx + \int_0^T dt \int_{\Omega} (-\psi_t + \lambda \psi) y dx.
\end{aligned} \tag{3.43}$$

Нехай $\lambda_0(x, t)$ – оптимальна стратегія пошуку, а $y_0(x, t)$ – відповідне рішення (3.35). Позначимо

$$\Delta \lambda(x, t) = \lambda_0(x, t) - \lambda(x, t), \quad \Delta y(x, t) = y_0(x, t) - y(x, t). \tag{3.44}$$

Записуючи (3.43) для (λ_0, y_0) і (λ, y) з рахунком того, що $\Delta y(x, 0) = 0$, отримаємо

$$\int_{\Omega} \psi(x, T) \Delta y(x, T) dx + \int_0^T dt \int_{\Omega} (-\psi_t + \lambda_0 \psi) \Delta y dx + \int_0^T dt \int_{\Omega} \Delta \lambda y_0 \psi dx - \int_0^T dt \int_{\Omega} \Delta \lambda \Delta y \psi dx = 0. \tag{3.45}$$

Вибираючи тепер функцію $\psi(x, t)$ так, що

$$\psi_t(x, t) = \lambda(x, t) \psi(x, t), \quad x \in \Omega, \quad t > 0. \tag{3.46}$$

і

$$\psi(x, T) = 1, \quad x \in \Omega, \tag{3.47}$$

перепишемо рівність (3.45) у вигляді

$$\int_{\Omega} \Delta y(x, T) dx = - \int_0^T dt \int_{\Omega} \Delta \lambda y_0 \psi dx + \int_0^T dt \int_{\Omega} \Delta \lambda \Delta y \psi dx. \tag{3.48}$$

Так як $\int_{\Omega} y_0(x, T) dx \leq \int_{\Omega} y(x, T) dx$ для всіх функцій, що задовольняють (3.35) і (3.38), отримаємо $\int_{\Omega} \Delta y(x, T) dx \leq 0$, тобто тотожність (3.48) приймає вигляд:

$$\int_0^T dt \int_{\Omega} \Delta \lambda y_0 \psi dx - \int_0^T dt \int_{\Omega} \Delta \lambda \Delta y \psi dx \geq 0. \tag{3.49}$$

У цьому випадку рішення крайової задачі (3.46)-(3.47) можна записати у вигляді:

$$\psi(x, t) = \exp\left(-\int_t^T \lambda(x, \tau) d\tau\right), \quad (3.50)$$

Із (3.41) і (3.50) тепер слід, що

$$y(x, t)\psi(x, t) = u(x) \exp\left(-\int_{t(x)}^T \lambda(x, \tau) d\tau\right), \quad (3.51)$$

причому це співвідношення справедливо для всіх $x \in \Omega$ і всіх $t > 0$.

Відзначимо, що права частина виразу (3.51) не залежить від t . Допустимо тимчасово, що $\lambda(x, t)$ – довільна функція, тоді з (3.41) і (3.51) слід рівність: $y\psi_t + y_t\psi = (y\psi)_t = 0$, яка означає, що $y(x, t)\psi(x, t) = C(x)$, де $C(x)$ – деяка функція от x в Ω .

Визначимо порядок величини $\int_0^T dt \int_{\Omega} \Delta\lambda \Delta y \psi dx$ в (3.49). Зробимо це для випадку, коли $\Delta\lambda(x, t)$ неперервна для всіх $x \in \Omega$, $t > 0$ и $t(x) \equiv 0$ для всіх $x \in \Omega$. Із (3.41) випливає, що

$$\Delta y = u(x) \left[\exp\left(-\int_0^t \lambda_0(x, \tau) d\tau\right) - \exp\left(-\int_0^t \lambda(x, \tau) d\tau\right) \right]. \quad (3.52)$$

В результаті за допомогою (3.51) для малих $|\Delta\lambda(x, \tau)|$ отримуємо

$$\Delta y \psi = u(x) \exp\left(-\int_0^T \lambda(x, \tau) d\tau\right) \left(-\int_0^t \Delta\lambda(x, \tau) d\tau\right). \quad (3.53)$$

Отже,

$$\int_0^T dt \int_{\Omega} \Delta\lambda \Delta y \psi dx = - \int_0^T dt \int_{\Omega} u(x) \exp\left(-\int_0^t \lambda(x, \tau) d\tau\right) \Delta\lambda(x, t) \int_0^t \Delta\lambda(x, \tau) d\tau dx, \quad (3.54)$$

і остаточно, за допомогою теореми Фубіні, отримаємо

$$\int_0^T dt \int_{\Omega} \Delta\lambda \Delta y \psi dx = - \frac{1}{2} \int_{\Omega} u(x) \exp\left(-\int_0^T \lambda_0(x, \tau) d\tau\right) \left(\int_0^T \Delta\lambda(x, \tau) d\tau\right)^2 dx. \quad (3.55)$$

Значить, якщо $\Delta\lambda = O(\varepsilon)$, то

$$\int_0^T dt \int_{\Omega} \Delta \lambda y_0 \psi dx = O(\varepsilon) \quad (3.56)$$

i

$$\int_0^T dt \int_{\Omega} \Delta \lambda \Delta y \psi dx = O(\varepsilon^2). \quad (3.57)$$

У більш загальному випадку, коли $t(x) > 0$ для деяких x із Ω , можна застосувати голкову варіацію функції $\lambda_0(x, \tau)$ замість безперервної, використовуюваної вище, тоді будуть справедливі оцінки (3.56)-(3.57).

Тепер із (3.49), (3.57) получим така умова оптимальності:

$$\int_0^T dt \int_{\Omega} \Delta \lambda(x, t) y_0(x, t) \psi(x, t) dx \geq 0. \quad (3.58)$$

Так як передбачається, що стратегія пошуку $\lambda(x, t)$ є кусочно-безперервною функцією, то будемо використовувати голкову варіацію. Визначимо характеристичну функцію $\chi(\xi, \sigma)$ наступним образом:

$$\chi(x', t; \xi, \sigma) = \begin{cases} 1 & \text{для } (x, t) \in S(x', \xi) \times [t, t + \sigma], \\ 0 & \text{для } (x, t) \notin S(x', \xi) \times [t, t + \sigma] \end{cases} \quad (3.59)$$

де

$$S(x', \xi) = \{x : \|\bar{x} - x'\| < \xi, \quad x', \bar{x} \in \Omega\}$$

Задаємо варіацію $\Delta \lambda(x, t)$ в виде

$$\Delta \lambda(x, t) = \varepsilon \chi(x_1, t; \xi, \sigma) - \varepsilon \chi(x_2, t; \xi, \sigma), \quad (3.60)$$

тоді для $t \in [0, T]$ виконується співвідношення

$$\int_{\Omega} [\lambda_0(x, t) + \Delta \lambda(x, t)] dx = \int_{\Omega} \lambda_0(x, t) dx = L(t). \quad (3.61)$$

Отже, умова (3.37) задовольняється, а умова (3.36) буде виконано, якщо прийняти таке припущення.

Нехай $\lambda_0(x, t) \equiv 0$ для всіх (x, t) , таких що $(x, t) \in S(x_i, \xi) \chi(t, t + \sigma)$, $i = 1, 2$, тоді при $x = x_i$ можлива тільки позитивна варіація. Тому завжди необхідно, щоб

$$\varepsilon < \min\{\lambda(x, t) \chi(x_1, t; \xi, \sigma), \lambda(x, t) \chi(x_2, t; \xi, \sigma)\}.$$

Підставимо тепер $\Delta \lambda(x, t)$ із (3.60) в умову (3.58), отримаємо:

$$\int_0^T dt \int_{\Omega} \Delta \lambda y_0 \psi dx = \int_0^T d\tau \left\{ \int_{S(x_1, \xi)} y_0 \psi dx - \int_{S(x_2, \xi)} y_0 \psi dx - \right\} \geq 0 \quad (3.62)$$

Так як $y(x, t)$ і $\psi(x, t)$ є безперервними функціями в $S(x_1, \xi) \times [t, t + \sigma]$ і $S(x_2, \xi) \times [t, t + \sigma]$ відповідно, то в силу рівності $m(S(x_1, \xi) \times [t, t + \sigma]) = m(S(x_2, \xi) \times [t, t + \sigma])$ маємо

$$m(S(x_1, \xi) \times [t, t + \sigma]) \times [y_0(\bar{x}_1, t) \psi(\bar{x}_1, t) - y_0(\bar{x}_2, t) \psi(\bar{x}_2, t)] \geq 0, \quad (3.63)$$

де $\bar{x}_1 \in S(x_1, \xi)$, $\bar{x}_2 \in S(x_2, \xi)$, а $m(S(x, \xi) \times [t_1, t_2])$, як і вище, означає міру множини $(S(x, \xi) \times [t_1, t_2])$. При $\xi \rightarrow 0$ умова (3.63) переходить в

$$y_0(x_1, t) \psi(x_1, t) - y_0(x_2, t) \psi(x_2, t) \geq 0, \quad t \in [t, t + \sigma]. \quad (3.64)$$

Припустимо спочатку, що $\lambda_0(x, t) > 0$ для $(x, t) \in \bigcup_{i=1,2} S(x_i, \xi) \times [t, t + \sigma]$, тоді точки x_1 і x_2 в (3.64) можна поміняти місцями. Іншими словами, маємо, крім (3.64), наступну нерівність:

$$y_0(x_2, t) \psi(x_2, t) - y_0(x_1, t) \psi(x_1, t) \geq 0, \quad t \in [t, t + \sigma]. \quad (3.65)$$

Так як x_1 і x_2 довільні (але такі, що $\lambda(x, t) > 0$ для всіх $(x, t) \in \bigcup_{i=1,2} S(x_i, \xi) \times [t, t + \sigma]$), то нерівності (3.64) і (3.65) означають, що

$$y_0(x, t) \psi(x, t) = \hat{C}(t), \quad (x, t) \in \Omega_+(t) \times [0, T], \quad (3.66)$$

де множину $\Omega_+(t)$ було визначено в (3.39), а $\hat{C}(t)$ – деяка функція від t .

Так як з (3.51) випливає, що добуток $y_0(x, t) \psi(x, t)$ є функція тільки змінної x , то необхідно, що б $\hat{C}(t) = const$. Отже,

$$y_0(x, t) \psi(x, t) = C \quad \text{для} \quad (x, t) \in \Omega_+(t) \times [0, T], \quad (3.67)$$

де C – деяка постійна, яка визначається з умови (3.37).

Нехай тепер $S(x_1, \xi) \times [t, t + \sigma] \notin \Omega_+(t) \times [0, T]$ в (3.64). Варіювання $\lambda(x, t)$ всередині $S(x_1, \xi) \times [t, t + \sigma]$ допустимо тепер тільки в позитивному напрямку. Нерівність (3.65) вже не виконується, тому з (3.64) і (3.67) випливає, що

$$y_0(x, t) \psi(x, t) \geq C \quad \text{для} \quad (x, t) \notin \Omega_+(t) \times [0, T], \quad (3.68)$$

де C – та ж сама постійна, що і в (3.57). Тому приходимо до умови оптимальності

$$\begin{aligned} y_0(x,t)\psi(x,t) &= C \quad \text{для } (x,t) \in \Omega_+(t) \times [0,T], \\ y_0(x,t)\psi(x,t) &\geq C \quad \text{для } (x,t) \notin \Omega_+(t) \times [0,T], \end{aligned} \quad (3.69)$$

яка, відповідно до (3.51), може бути переписана в наступному вигляді:

$$u(x) \exp\left(-\int_{t(x)}^T \lambda(x,\tau) d\tau\right) = C \quad \text{для } x \in \bigcup_{t \in [0,T]} \Omega_+(t), \quad (3.70)$$

$$u(x) \exp\left(-\int_{t(x)}^T \lambda(x,\tau) d\tau\right) \geq C \quad \text{для } x \in \Omega \setminus \bigcup_{t \in [0,T]} \Omega_+(t),$$

Зауважимо, що в (3.69) $t \in [0, T]$, в той час, як вираз $u(x) \exp\left(-\int_{t(x)}^T \lambda(x,\tau) d\tau\right)$ в (3.70) одне і те ж для всіх $t \in [0, T]$. Це означає, що $x \in \bigcup_{t \in [0,T]} \Omega_+(t)$.

Підставимо із (3.26) $\varphi(x,T) = \int_{t(x)}^T \lambda(x,\tau) d\tau$ і візьмемо до уваги (3.39), яке є вже відомим умовою оптимальності пошукового зусилля $\varphi(x,t)$. Так як

$$\int_{\Omega_C} dx \int_{t(x)}^T \lambda(x,\tau) d\tau = \int_0^T d\tau \int_{\Omega_+(\tau)} \lambda(x,\tau) dx, \quad (3.71)$$

де $\Omega_C = \bigcup_{t \in [0,T]} \Omega_+(t)$, то з урахуванням умови (3.37) отримаємо

$$\int_{\Omega_C} \ln \frac{u(x)}{C} dx = \int_{\Omega_C} dx \int_{t(x)}^T \lambda(x,\tau) d\tau = \int_0^T L(\tau) d\tau. \quad (3.72)$$

Постійну C можна визначити з умови (3.72). Завдання знаходження C , однак, не може бути вирішена безпосередньо при заданій щільності розподілу $u(x)$, так як крім C невідома також множина Ω_C . Тому отримуємо тепер рівняння, для визначення стратегії пошуку $\lambda(x,t)$, використовуючи умова оптимальності (3.70). маємо співвідношення

$$\int_{t(x)}^T \lambda(x,\tau) d\tau = \ln \frac{u(x)}{C}, \quad x \in \Omega_C, \quad (3.73)$$

де постійна C була отримана із (3.72).

Функція $t(x)$, згідно (3.39), має властивість

$$\Omega_+(t) = \{x : t(x) \leq t, \quad x \in \Omega\}. \quad (3.74)$$

Нехай $x(t)$ – зворотня до $t(x)$ функція. Припустимо, що існує вектор ε такий, що має місце одне з двох співвідношень:

$$x(t) - \varepsilon \in \Omega_+(t) \quad \text{або} \quad x(t) + \varepsilon \in \Omega_+(t). \quad (3.75)$$

Нехай для визначеності $x(t) - \varepsilon \in \Omega_+(t)$, тоді

$$\ln \frac{u(x)}{u(x - \varepsilon)} = \int_{t(x)}^T \lambda_0(x, \tau) d\tau - \int_{t(x - \varepsilon)}^T \lambda_0(x - \varepsilon, \tau) d\tau. \quad (3.76)$$

Припустимо ще, що щільність розподілу $u(x)$ має безперервну похідну в сфері $S(x, \varepsilon)$, а стратегія пошуку $\lambda(x, t)$ володіє таким же властивістю при $t \in [0, T]$, тоді, по - перше,

$$\ln \frac{u(x)}{u(x - \varepsilon)} = \varepsilon \cdot \nabla \ln u(x) + o(\varepsilon), \quad (3.77)$$

де $\varepsilon \cdot \nabla \ln u(x) = \sum_{k=1}^n \varepsilon_k \frac{\partial \ln u(x)}{\partial x_k}$, і, по-друге, справедливо

$$\begin{aligned} & \int_{t(x)}^T \lambda_0(x, \tau) d\tau - \int_{t(x - \varepsilon)}^T \lambda_0(x - \varepsilon, \tau) d\tau = \\ & = \int_{t(x)}^T [\lambda_0(x, \tau) - \lambda_0(x - \varepsilon, \tau)] d\tau - \int_{t(x - \varepsilon)}^{t(x)} \lambda_0(x - \varepsilon, \tau) d\tau = \\ & = \varepsilon \left\{ \int_{t(x)}^T (\nabla \lambda_0(x, \tau))_+ d\tau - \nabla t(x) \lambda_0(x, t(x)) \right\} + o(\varepsilon), \end{aligned} \quad (3.78)$$

де $x \in \Omega_c$. Із (3.76), (3.77) і (3.78) випливає, що

$$\nabla \ln u(x) = \int_{t(x)}^T (\nabla \lambda_0(x, \tau))_+ d\tau - \nabla t(x) \lambda_0(x, t(x)), \quad (3.79)$$

де $(\nabla\lambda_0(x,\tau))_+$ означає, що похідна береться в такій точці x , що $S(x,\varepsilon)\cap\Omega\setminus\Omega_+(t(x-\varepsilon))=0$, але в той же час $S(x,\varepsilon)\cap\Omega_+(t(x+\varepsilon))\neq 0$.

Припустимо тепер, що існує постійна $0 < M < \infty$ така, що

$$\lambda(x,t) \leq M \quad \text{для всіх } (x,t) \in \Omega \times [t-\varepsilon, T], \quad (3.80)$$

де $\varepsilon > 0$, тоді для безперервності інтеграла $\int_{t(x)}^T \lambda(x,\tau) d\tau$ досить зажадати, щоб $\lambda(x,t)$ була безперервною функцією від x на відрізку $[0, T]$.

Виходячи з цього, стратегія пошуку може мати наступний характер. Простір Ω розбивається поверхнями $t_1(x), t_2(x), \dots, t_m(x)$ на частини $\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_m$ таким чином, що $\lambda(x,t)$ являється неперервною функцією от (x,t) в кожному з підмножин $\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_m$ і може мати розриви на поверхні $t_1(x), t_2(x), \dots, t_m(x)$.

Умова (3.79) накладає додаткові вимоги на стратегію пошуку $\lambda(x,t)$. Тепер інтеграл $\int_{t(x)}^T (\nabla\lambda(x,\tau))_+ d\tau$ також повинен існувати при кожному $x \in \Omega$.

Крім того, цей інтеграл повинен мати такі ж розриви, як і похідна $\nabla \ln u(x)$.

Якщо розглянути тільки умову (3.73), то у виборі стратегії пошуку існує ще достатньо свободи. Можна, наприклад, покласти

$$t(x) \equiv 0, \quad \lambda(x,t) = \frac{1}{T} \ln \frac{u(x)}{C}, \quad (3.81)$$

і тоді пошук буде задовольняти необхідним умовам оптимальності. Велика частина довільних стратегій пошуку $\lambda(x,t)$, які задовольняють умові (3.73), будуть залежати від заданого часу T . Якщо T змінюється, то обрана стратегія пошуку $\lambda(x,t)$ теж повинна змінюватися.

Якщо далі обмежити множину можливих стратегій пошуку таким чином, щоб рівняння (3.79) було справедливо для всіх $(x,t) \in \Omega \times [0, T]$, то отримаємо, що стратегія пошуку $\lambda(x,t)$ знову, в загальному випадку, буде залежати від T – заданого часу пошуку.

Отже, головним критерієм вибору оптимальної стратегії пошуку нерухомій цілі є заданий час вирішення завдання або певний технічними та оперативними умовами час пошуку джерела загоряння в радіоактивному лісовому масиві комплексною пошуковою системою.

Таким чином, початкові умови задачі своєчасного виявлення джерела загоряння в радіоактивно-забрудненому лісовому масиві визначаються наступними п'ятьма положеннями: пошук здійснюється в двохкоординатній системі; джерело загоряння нерухоме і розвивається, збільшуючи свої геометричні роз-

міри і змінюючи фізичні характеристики, що впливають на його виявлення; пошукове устаткування не досконале і вимагає залучення хоча б одну людину-оператора пошукової системи; пошук здійснюється комплексною (що складається з автономних авіаційних і космічних носіїв) пошуковою системою, головна властивість якої полягає в тому, що дії окремих пошукових одиниць можна представити за допомогою однієї і тієї ж функції, яка визначається як стратегія пошуку; вибір оптимальної стратегії пошуку визначається заданим часом рішення задачі.

3.3 Застосування математичних закономірностей для пошуку радіаційних провісників пожеж радіоактивно-забруднених лісових масивів з використанням розвідувальних безпілотних літальних апаратів і визначення граничних умов рішення задачі

Для визначення математичних закономірностей, що описують рішення задачі пошуку радіаційних провісників пожеж радіоактивно-забруднених лісових масивів з використанням розвідувальних безпілотних літальних апаратів в заданих граничних умовах [143-146] проаналізуємо зміну стратегій пошуку в залежності від зміни часу рішення пошукового завдання, розглянемо процедури отримання оптимальних стратегій пошуку і проаналізуємо пошукові характеристики безпілотних літальних апаратів та їх вплив на оптимальні стратегії пошуку.

3.3.1 Аналіз зміни стратегій пошуку в залежності від зміни часу рішення пошукової задачі

Ідеальною ситуацією для використання пошукової системи є така її організація, коли вона (пошукова система) контролює весь лісовий масив, всю поверхню земного покриву. В цьому випадку при виникненні вогнища пожежі він буде виявлений, і ситуація ліквідації вогню буде взята під контроль практично з моменту його появи. Очевидно, що така ситуація є ідеальною, і на практиці може реалізуватися тільки в охоронних системах, коли периметр або охоронюваний прохід одночасно контролюється кількома камерами спостереження. Спостереження за лісовим масивом з цієї точки зору може бути тільки періодичним або дискретним. Безпілотні літальні апарати не можуть цілодобово здійснювати баражування над лісами. Навіть перебуваючи в повітрі, вони переглядають смугу вздовж маршруту польоту і можуть вести постійне спостереження за всіма визначеними точками лісового масиву. У зв'язку з цим приймемо допущення, що $\nabla \lambda_0(x, t) \equiv 0$ майже для всіх $(x, t) \in \Omega \times [0, T]$, тоді рівняння (3.79) приймає вигляд:

$$\nabla \ln u(x) = -\nabla t(x) \lambda_0(t(x)), \quad x \in \Omega,$$

де можна записати $\lambda_0(x, t) = \lambda_0(t)$ або

$$\ln u(x) + \int_0^{t(x)} \lambda_0(\tau) d\tau = \text{const}. \quad (3.82)$$

При цьому умова (3.37) переходить в

$$m(\Omega_+, (t)) \lambda_0(t) = L(t). \quad (3.83)$$

Припустимо, що (якщо відбувається спалах, то воно відбувається тільки в районі, який контролюється пошуковою системою)

$$\Omega_C = \bigcup_{t \in [0, T]} \Omega_+(t) = \Omega_+ L(\hat{t}), \quad (3.84)$$

де $\hat{t} \in [0, T]$. Крім того, визначимо функцію $\tilde{C}(z)$ рівністю

$$z = m(\Omega_+(\hat{t})) = m(u(x) > \tilde{C}(z)) = m(\Omega_C), \quad (3.85)$$

де $m(A)$ – міра множини A .

Нехай тепер $t(\hat{x}) = \hat{t}$. Так як $\int_{t(x)}^T \lambda(x, \tau) d\tau = 0$ уздовж границі $\Omega_+(t)$, то із (3.73), (3.74) і (3.85) слід, що $u(x) = C = \tilde{C}(z)$, так що (3.82) переходить в

$$\ln \tilde{C}(z) + \int_0^{\hat{t}} \lambda(\tau) d\tau = \text{const}, \quad x \in \Omega_+(\hat{t}). \quad (3.86)$$

Вводячи позначення, $m(\Omega_+(\hat{t} - h)) = z - \varepsilon$, отримуємо із (3.86) виразу

$$\int_{\hat{t}-h}^{\hat{t}} \lambda(\tau) d\tau = \int_{\hat{t}(z-\varepsilon)}^{\hat{t}(z)} \lambda(\tau) d\tau = \ln \frac{\tilde{C}(z-\varepsilon)}{\tilde{C}(z)}, \quad (3.87)$$

яке з границі при $h \rightarrow 0$ приймає вигляд:

$$\left(\frac{d}{dz} \ln \tilde{C}(z) \right)_{z=0} = - \left(\frac{d}{dz} \hat{t}(z) \right)_{z=0} \lambda(\hat{t}(z-0)) \quad (3.88)$$

або з урахуванням (3.83),

$$\frac{dz}{d\hat{t}} = -\frac{\tilde{C}(z)L(\hat{t})}{z\tilde{C}'(z)}. \quad (3.89)$$

Рівняння (3.89) є диференціальним рівнянням першого порядку щодо функції $z(t)$. Тому необхідно поставити додаткову умову, а саме:

$$\Omega_0 = \left\{ x : u(x) = \max_{x \in \Omega} u(x) \right\}. \quad (3.90)$$

Тоді очевидно, що

$$z(0) = m(\Omega_0). \quad (3.91)$$

Отже, зі зміною часу рішення пошукової задачі (часу перебування літального апарату в повітрі) буде змінюватися величина пошукового зусилля і, відповідно, буде змінюватися стратегія пошуку. Залежно від збільшення або зменшення часу рішення пошукової задачі пошукові зусилля будуть зростати або спадати.

3.3.2 Характеристика процедури отримання оптимальних стратегій пошуку

Здійснюючи пошук джерела загоряння, безпілотний літальний апарат може знаходитися в повітрі строго певний проміжок часу, як правило, залежить від запасу палива, швидкості і висоти польоту і інших технічних факторів. Стратегія пошуку буде вважатися оптимальною або рівномірно оптимальною, коли пошукові зусилля залишаються однаковими протягом всього часу виконання завдання.

Позначимо через T_d час, необхідний для виявлення цілі при використанні заданої стратегії пошуку, і припустимо, що $E(T_d) < \infty$, тоді, використовуючи ймовірність невиявлення цілі за проміжок часу $(0, t)$, позначену $Q(t)$, отримаємо

$$E(T_d) = \lim_{A \rightarrow \infty} \int_0^A t d(1 - Q(t)) = \lim_{A \rightarrow \infty} \left[A(1 - Q(A)) + \int_0^A Q(\tau) d\tau \right] = \int_0^{\infty} Q(\tau) d\tau. \quad (3.92)$$

Звідки випливає, що

$$E(T_d) = \int_0^{\infty} \left(\int_{\Omega} y(x, t) dx \right) dt. \quad (3.93)$$

Стратегія рівномірно оптимального пошуку має таку властивість, що вона мінімізує $\int_{\Omega} y(x, t) dx$ для кожного $t > 0$. Це випливає з того, що цільовий фун-

кціонал задачі управління, за допомогою якого визначається оптимальна стратегія пошуку, представляється у вигляді інтеграла $\int_{\Omega} y(x, t) dx$, тому стратегія рівномірно оптимального пошуку забезпечує мінімальне значення величини $E(T_d)$.

Нехай розташування цілі задається рівномірної щільністю розподілу

$$u(x) = \begin{cases} [m(A)]^{-1}, & \text{если } x \in A, \\ 0, & \text{если } x \notin A, \end{cases} \quad (3.94)$$

де область A довільна.

Очевидно, що $\Omega_{\tilde{C}} = \{x : u(x) > \tilde{C}\} = A$ для всіх $\tilde{C} \leq m(A)^{-1}$. Звідси згідно (3.83) випливає, що стратегія пошуку має наступне постійне значення:

$$\lambda_0(t) = \frac{L(t)}{m(A)}. \quad (3.95)$$

Це дозволяє почати пошук із заданою частиною кордону множини A і поширити пошук по всій області A протягом заданого часу $(0, T)$ таким чином, щоб виконувалася умова (3.73). Тоді стратегія рівномірно оптимального пошуку, яка визначається (3.95), буде оптимальною.

Іншим видом розподілу є нормальний розподіл. Нехай щільність розподілу задана у вигляді:

$$u(x) = (2\pi\sigma^2)^{-1} \exp(-x^2 / 2\sigma^2), \quad (3.96)$$

де $x^2 = x_1^2 + x_2^2$, тоді

$$\Omega_{\tilde{C}} = \{x : u(x) > \tilde{C}\} = \left\{ x : x^2 < 2\sigma^2 \ln\left(\frac{1}{2\pi\sigma^2\tilde{C}}\right) \right\}, \quad (3.97)$$

звідки

$$z = m(\Omega_{\tilde{C}}) = 2\pi\sigma^2 \ln\left(\frac{1}{2\pi\sigma^2\tilde{C}}\right), \quad (3.98)$$

значить

$$\tilde{C} = (2\pi\sigma^2)^{-1} \exp(-z / 2\pi\sigma^2). \quad (3.99)$$

Рівняння (3.89) приймає тепер вигляд:

$$\frac{dz}{dy} = \frac{2\pi\sigma^2}{z} L(t). \quad (3.100)$$

Загальне рішення рівняння (3.100) дорівнює

$$z(t) = \sqrt{z^2(0) + 4\pi\sigma^2 \int_0^t L(\tau) d\tau} \quad (3.101)$$

Тут $z(0) = m(\Omega_+(0))$. У зв'язку з рівнянням (3.91), $\Omega_+(0) = \{0\}$, так що

$$z(t) = 2\sigma \sqrt{\pi \int_0^t L(\tau) d\tau}. \quad (3.102)$$

Так як

$$z(t)\lambda_0(t) = L(t), \quad (3.103)$$

то з (3.83) випливає, що

$$\lambda_0(x,t) = \frac{L(t)}{2\sigma \sqrt{\pi \int_0^t L(\tau) d\tau}} \theta \left(\sqrt{2\sigma} \sqrt[4]{\frac{1}{\pi} \int_0^t L(\tau) d\tau} - |x| \right), \quad (3.104)$$

де $\theta(u) = 1$, якщо $u \geq 0$, і $\theta(u) = 0$, якщо $u < 0$.

Тепер видно, що рівномірно оптимальна стратегія пошуку зосереджена всередині кола радіуса

$$r(t) = \sqrt{2\sigma} \sqrt[4]{\frac{1}{\pi} \int_0^t L(\tau) d\tau}. \quad (3.105)$$

Отже, в момент часу $t = 0$ все пошукове зусилля концентрується в точці $x = 0$ так, що якщо не виконується

$$\left(\frac{L(t)}{\sqrt{\int_0^t L(\tau) d\tau}} \right)_{t=0} < \infty,$$

То стратегія пошуку $\lambda_0(t)$ безкінечна в момент часу $t = 0$.

Якщо функція $L(t)$ така, що величина

$$\left(\frac{L(t)}{\sqrt{\int_0^t L(\tau) d\tau}} \right)_{t=0} = 1,$$

тобто кінцева, тоді не виникає ніяких нескінченних величин в процесі пошуку.

Така ситуація відповідає випадку, коли система пошуку поступово доставляється до місця пошуку (літальний апарат злітає, летить до лісового масиву і, тільки після того як долетів, починає пошук). Функція $L(t)$ може бути досить загального вигляду: крім того, що $0 < l < \infty$, потрібно лише існування інтеграла

$$\int_0^t L(\tau) d\tau \text{ для всіх } t > 0.$$

Тепер легко обчислити функцію пошукового зусилля, яка визначається (3.26) і (3.73):

$$\begin{aligned} \varphi(x, t) &= \frac{1}{2\sigma\sqrt{\pi}} \int_{\min\left(t, g^{-1}\left(\frac{\pi x^4}{4\sigma^2}\right)\right)}^t \left(\frac{L(\tau)}{\sqrt{\int_0^t L(\tau) d\tau}} \right) d\tau = \\ &= \max\left(0, \frac{1}{2a^2} \left\{ \sqrt{\frac{4\sigma^2}{\pi} \int_0^t L(\tau) d\tau} - x^2 \right\}\right), \end{aligned} \quad (3.106)$$

де

$$g(t) = \int_0^t L(\tau) d\tau.$$

Далі, з (3.41), (3.69) і (3.106) випливає, що

$$y(x, t) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(\frac{1}{\sigma} \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^t L(\tau) d\tau}\right) & \text{для } |x| \leq \sqrt{2\sigma^4} \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^t L(\tau) d\tau}, \\ u(x) & \text{для } |x| > \sqrt{2\sigma^4} \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^t L(\tau) d\tau}. \end{cases} \quad (3.107)$$

Імовірність невиявлення цілі виходить з рівняння (3.32) і (3.107) у вигляді:

$$\begin{aligned}
Q(t) &= \int_{\Omega} y(x,t) dx = z\tilde{C}(z) + \exp\left(-\frac{z}{2\pi\sigma^2}\right) = \\
&= \left(1 + \frac{1}{\sigma\sqrt{\pi}} \sqrt{\int_0^t L(\tau) d\tau}\right) \exp\left(-\frac{1}{\sigma\sqrt{\pi}} \sqrt{\int_0^t L(\tau) d\tau}\right). \tag{3.108}
\end{aligned}$$

Нарешті з (3.108) і (3.92) визначається середній час, необхідний для виявлення цілі:

$$E(T_d) = \int_0^{\infty} Q(\tau) d\tau = \int_0^{\infty} \left(1 + \frac{1}{\sigma\sqrt{\pi}} \sqrt{\int_0^{\tau} L(\bar{\tau}) d\bar{\tau}}\right) \exp\left(-\frac{1}{\sigma\sqrt{\pi}} \sqrt{\int_0^{\tau} L(\bar{\tau}) d\bar{\tau}}\right) d\tau. \tag{3.109}$$

В окремому випадку, коли

$$L(t) = L_0 = \text{const}, \tag{3.110}$$

результати, отримані вище, спрощуються, при цьому з (3.104) отримаємо:

$$\lambda_0(t) = \frac{1}{2\sigma} \sqrt{\frac{L_0}{\pi t}} \theta\left(\sqrt{2\sigma} \sqrt[4]{\frac{L_0 t}{\pi}} - |x|\right). \tag{3.111}$$

Стратегія пошуку зосереджена всередині кола радіуса (з урахуванням (3.105))

$$|r(t)| = \sqrt{2\sigma} \sqrt[4]{\frac{L_0 t}{\pi}}. \tag{3.112}$$

Імовірність того, що ціль не буде виявлена протягом часу $(0, t)$, згідно (3.108), записується у вигляді:

$$Q(t) = \left(1 + \sqrt{\frac{L_0 t}{\pi\sigma^2}}\right) \exp\left(-\sqrt{\frac{L_0 t}{\pi\sigma^2}}\right). \tag{3.113}$$

Середній час, необхідний для виявлення цілі, буде знаходитися з (3.109) за формулою:

$$E(T_d) = \int_0^{\infty} Q(\tau) d\tau = \frac{6\pi\sigma^2}{L_0}. \tag{3.114}$$

Іншими словами, щоб отримати оптимальні стратегії пошуку, процедури використання літальних апаратів повинні бути такими, щоб забезпечувалася максимальна дальність виявлення джерела загоряння і, відповідно, найбільша ширина перегляду (пошуку) уздовж маршруту польоту.

3.3.3 Пошукові характеристики безпілотних літальних апаратів та їх вплив на оптимальні стратегії пошуку

Безпілотний літальний апарат, як автономний технічний засіб пошуку, має наступні характеристики: висота і швидкість польоту, час перебування в повітрі, канал (система) виявлення і система управління і передачі даних.

Висота польоту характеризується трьома величинами.

1) Стеля або максимальна висота, на яку може підніматися літальний апарат і здійснювати політ в інтересах перельоту або вирішення різних завдань, наприклад, пошукових, забезпечення зв'язку, виносного коректування поста та інших.

Мінімальна висота польоту – це висота, на якій літальний апарат стійко тримається в повітрі і виконує завдання, для вирішення яких він призначений. Пошукова або крейсерська висота польоту – висота, на якій забезпечується, з одного боку, мінімальна витрата палива, а з іншого, досягається найбільше пошукове зусилля.

Швидкість польоту також характеризується трьома значеннями:

- максимальної, яку може розвивати літальний апарат;
- мінімальної, при якій літальний апарат стійко тримається в повітрі і зберігає свої маневрені параметри;
- крейсерської або пошукової швидкістю, на якій забезпечується мінімальна витрата палива і досягається найбільше пошукове зусилля.

Час польоту залежить від перших двох характеристик, тому для його розрахунку використовують параметри висоти і швидкості, тобто знаходять:

- 1) час польоту на максимальній, мінімальній та пошуковій висоті;
- 2) час польоту максимальної, мінімальної та крейсерською швидкістю.

Основним каналом пошуку безпілотного літального апарату є телевізійний або оптоелектронний канал, який забезпечує перегляд певної частини простору через поточні фіксації візуальних образів і відеозображень керованої телевізійної (оптоелектронної) системою і передачі їх із автоматизованих засобів зв'язку оператору спостереження.

Керована телевізійна система забезпечує дискретний перегляд всієї нижньої півсфери простору і 12-24 кратне збільшення візуальних образів.

Цифрові системи обробки і передачі інформації дозволяють оператору вести спостереження в режимі реального масштабу часу. Канал пошуку характеризується трьома параметрами:

- 1) найбільшою або максимальною дальністю виявлення об'єкта пошуку;
- 2) кутами одночасного перегляду простору, які забезпечують ширину смуги, що переглядається, уздовж маршруту польоту;
- 3) можливістю додаткової ідентифікації, яка може здійснюватися як розворотом камери оптоелектронної системи, так і використанням інших каналів спостереження, розміщених на літальному апараті, так і інших пошукових одиницях. Додатковими каналами спостереження можуть бути інфрачервоний (тепловий) і радіаційний.

У нашому випадку радіаційний канал є основним, так як з його допомогою можна виявити провісники надзвичайної ситуації, викликані пожежею в радіоактивно-забрудненому лісовому масиві, ще до того, як з'являються візуальні і інфрачервоні образи, які супроводжують лісові пожежі.

З урахуванням вищевикладеного, розглянемо пошуковий випадок, коли

$$u(x) = \frac{1}{4\pi} \left\{ \frac{1}{\sigma_1^2} \exp\left[-\frac{(x-x_1)^2}{2\sigma_1^2}\right] + \frac{1}{\sigma_2^2} \exp\left[-\frac{(x-x_2)^2}{2\sigma_2^2}\right] \right\}, \quad (3.115)$$

де $(x-x_1)^2 = (x_1-x_{11})^2 + (x_2-x_{12})^2$ и $(x-x_2)^2 = (x_1-x_{21})^2 + (x_2-x_{22})^2$.

Припустимо, що відстань $|x_1-x_2|$ така велика, що більшість

$$\Omega_C = \{x : u(x) > C\} \quad (3.116)$$

і складається з двох кіл, і що $\sigma_1 < \sigma_2$. Тоді пошукове зусилля в момент часу $t=0$ концентрується в точці x_1 , і система пошуку, представлена стратегією пошуку, безперервно поширюється в колі з центром в точці x_1 . Це буде відбуватися до тих пір, поки не настане момент

$$C = \frac{1}{4\pi\sigma_2^2}. \quad (3.117)$$

Після цього утворюється інша область пошуку у вигляді кола з центром в точці x_2 . Позначимо момент часу, коли $C = 1/(4\pi\sigma_2^2)$, через t_D . Тепер замість (3.97) маємо множину

$$\Omega_C = \left\{ \left\{ x : (x-x_1)^2 < 2\sigma_1^2 \ln\left(\frac{1}{4\pi\sigma_1^2 C}\right) \right\} \text{ для } 0 \leq t \leq t_D, \right. \\ \left. \left\{ x : (x-x_1)^2 < 2\sigma_1^2 \ln\left(\frac{1}{4\pi\sigma_1^2 C}\right) \right\} \cup \right. \\ \left. \left\{ x : (x-x_2)^2 < 2\sigma_2^2 \ln\left(\frac{1}{4\pi\sigma_2^2 C}\right) \right\} \text{ для } t > t_D, \right\} \quad (3.118)$$

а (3.98) переходить в

$$m(\Omega_C) = \begin{cases} 2\sigma_1^2 \pi \ln\left(\frac{1}{4\pi\sigma_1^2 C}\right) & \text{для } 0 \leq t \leq t_D, \\ 2\sigma_1^2 \pi \ln\left(\frac{1}{4\pi\sigma_1^2 C}\right) + 2\sigma_2^2 \pi \ln\left(\frac{1}{4\pi\sigma_2^2 C}\right) & \text{для } t > t_D. \end{cases} \quad (3.119)$$

Отже, при $0 \leq t \leq t_D$ із (3.99) отримаємо вираз:

$$C = \frac{1}{4\pi\sigma_1^2} \exp\left(-\frac{z}{2\pi\sigma_1^2}\right). \quad (3.120)$$

Для випадку одного нормального розподілу буде справедливо

$$z(t) = \sqrt{4\pi\sigma_1^2 \int_0^t L(\tau) d\tau}, \quad (3.121)$$

а для $0 \leq t \leq t_D$

$$z(t)\lambda_0(t) = L(t) \quad (3.122)$$

і

$$\lambda_0(t) = \frac{L(t)}{\sqrt{4\pi\sigma_1^2 \int_0^t L(\tau) d\tau}} \theta\left(\sqrt{2\sigma_1} \sqrt[4]{\frac{1}{\pi} \int_0^t L(\tau) d\tau} - |x - x_1|\right). \quad (3.123)$$

Рівняння (3.120)-(3.123) будуть справедливі до моменту часу t_D , який можна отримати, вирішуючи рівняння:

$$\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)^2 \exp\left(-\sqrt{\frac{1}{\pi\sigma_1^2} \int_0^t L(\tau) d\tau}\right) = 1. \quad (3.124)$$

Для $t > t_D$ згідно (3.119) маємо

$$z = m(\Omega_C) = -4\pi(\sigma_1^2 + \sigma_2^2) \ln C - 4\pi[\sigma_1^2 \ln(2\pi\sigma_1^2) + \sigma_2^2 \ln(2\pi\sigma_2^2)]. \quad (3.125)$$

Рівняння (3.89) тепер набирає вигляду

$$\frac{dz}{dt} = \frac{2\pi(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)}{z} L(t). \quad (3.126)$$

Його рішення буде рівне:

$$z(t) = \sqrt{C + 4\pi(\sigma_1^2 + \sigma_2^2) \int_{t_D}^t L(\tau) d\tau}, \quad (3.127)$$

де C – постійна інтегрування. Так як

$$z(t_D) = \sqrt{4\pi\sigma_1^2 \int_0^{t_D} L(\tau) d\tau}, \quad (3.128)$$

то приходимо до виразу

$$z(t) = 2\sigma_1 \sqrt{\pi \left[\int_0^{t_D} L(\tau) d\tau + \left(1 + \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2}\right) \int_{t_D}^t L(\tau) d\tau \right]},$$

Яке справедливе для $t > t_D$.

Виходячи з цього, стратегія пошуку поширюється навколо точки x_1 згідно закону

$$\lambda_0(t) = \begin{cases} \frac{L(t)\theta \left(\sqrt{2\sigma_1} \sqrt[4]{\frac{1}{\pi} \int_0^t L(\tau) d\tau} - |x - x_1| \right)}{2\sigma_1 \sqrt{\pi \int_0^t L(\tau) d\tau}} & \text{для } 0 \leq t \leq t_D, \\ \frac{L(t)\theta \left(\sqrt{2\sigma_1} \sqrt[4]{\frac{1}{\pi} \left[\int_0^{t_D} L(\tau) d\tau + \left(1 + \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2}\right) \int_{t_D}^t L(\tau) d\tau \right]} - |x - x_1| \right)}{2\sigma_1 \sqrt{\pi \left[\int_0^{t_D} L(\tau) d\tau + \left(1 + \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2}\right) \int_{t_D}^t L(\tau) d\tau \right]}} & \text{для } t > t_D. \end{cases} \quad (3.129)$$

і навколо точки x_2 згідно закону

$$\lambda_0(t) = \begin{cases} 0 & \text{для } 0 \leq t \leq t_D, \\ \frac{L(t)\theta \left[\sqrt{2\sigma_1} \sqrt[4]{\frac{1}{\pi} \left[\int_0^{t_D} L(\tau) d\tau + \left(1 + \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2}\right) \int_{t_D}^t L(\tau) d\tau \right]} \right]}{2\sigma_1 \sqrt{\pi \left[\int_0^{t_D} L(\tau) d\tau + \left(1 + \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2}\right) \int_{t_D}^t L(\tau) d\tau \right]}} - \\ \frac{\sqrt{2\sigma_1} \sqrt[4]{\frac{1}{\pi} \int_0^{t_D} L(\tau) d\tau} - |x - x_2|}{2\sigma_1 \sqrt{\pi \left[\int_0^{t_D} L(\tau) d\tau + \left(1 + \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2}\right) \int_{t_D}^t L(\tau) d\tau \right]}} & \text{для } t > t_D. \end{cases} \quad (3.130)$$

Результати, отримані для функції розподілу виду (3.115), показують, що подібні ситуації відбуваються при виявленні аномалій, які незначно виділяються над фоном і вимагають додаткової ідентифікації, як радіаційна ознака загоряння, що починається.

Розглянемо загальний випадок пошуку такого типу:

$$u(x) = \frac{1}{2\pi n} \sum_{k=1}^n \frac{1}{\sigma_k^2} \exp\left(-\frac{(x-x_k)^2}{2\sigma_k^2}\right). \quad (3.131)$$

Припустимо, що відстані між точками x_k досить великі, так що множина

$$\Omega_C = \{x : u(x) > C\}$$

буде складатися з кіл. Нехай при цьому $L(t)$ – непереривна функція.

Якщо складові в вираженні (3.131) розташовані так, що $\sigma_1 < \sigma_2 < \dots < \sigma_n$, то пошук буде починатися з вершини виявленої аномалії $\exp\left(-\frac{(x-x_1)^2}{2\sigma_1^2}\right)$ и, так як $C(z(t))$ в (3.85) зменшується, буде існувати послідовність моментів часу t_1, t_2, \dots, t_{n-1} така, що площина $u = C$ опускається і перетинає вершину аномалії $\exp\left(-\frac{(x-x_k)^2}{2\sigma_k^2}\right)$ в момент часу t_{k-1} .

Протягом інтервалу часу $[t_{k-1}, t_k]$ має місце співвідношення

$$\frac{1}{2\pi n \sigma_{k-1}^2} \geq C(z) > \frac{1}{2\pi n \sigma_k^2},$$

тоді

$$z(t) = m(u(x) > C(z)) = m\left(\frac{1}{2\pi n} \sum_{i=1}^k \frac{1}{\sigma_i^2} \exp\left(-\frac{(x-x_i)^2}{2\sigma_i^2}\right) > C(z)\right) \quad (3.132)$$

або

$$z(t) = -2\pi \ln(2\pi n C(z)) \sum_{i=1}^k \sigma_i^2 - 2\pi \sum_{l=1}^k \sigma_l^2 \ln \sigma_l^2. \quad (3.133)$$

Позначимо $z(t)$ на інтервалі $[t_{k-1}, t_k]$ через $z_k(t)$, тоді із (3.133) слід

$$C(z) = -\frac{1}{2\pi n} \exp\left[-\frac{\sum_{l=1}^k \sigma_l^2 \ln \sigma_l^2}{\sum_{l=1}^k \sigma_l^2}\right] \exp\left(-\frac{z_k}{2\pi \sum_{l=1}^k \sigma_l^2}\right). \quad (3.134)$$

Із рівняння (3.134) отримуємо

$$-2\pi \left(\sum_{l=1}^k \sigma_l^2\right) \frac{CdC(z)}{dz_k} = 1,$$

тоді рівняння (3.89) переходить в

$$\frac{dz_k}{dt} = \frac{2\pi}{z_k} \left(\sum_{l=1}^k \sigma_l^2\right) L(t) dt, \quad t \in [t_{k-1}, t_k] \quad (3.135)$$

і має рішення такого вигляду

$$z_k^t(t) = A_k + 4\pi \left(\sum_{l=1}^k \sigma_l^2\right) \int_{t_{k-2}}^t L(\tau) d\tau, \quad t \in [t_{k-1}, t_k]. \quad (3.136)$$

За допомогою (3.136) можна отримати наступне рівняння для визначення постійних інтегрування A_k :

$$A_k = A_{k-1} + 4\pi \left(\sum_{l=1}^{k-1} \sigma_l^2\right) \int_{t_{k-2}}^{t_{k-1}} L(\tau) d\tau, \quad (3.137)$$

тоді

$$z_k^2(t) = 4\pi \sum_{i=1}^k (\sigma_1^2 + \dots + \sigma_i^2) \int_{t_{i-1}}^{t_i} L(\tau) d\tau + 4\pi \left(\sum_{i=1}^k \sigma_i^2\right) \int_{t_{k-1}}^t L(\tau) d\tau. \quad (3.138)$$

З умови

$$C_k = \frac{1}{2\pi n \sigma_{k+1}^2}, \quad k = 1, \dots, n-1 \quad (3.139)$$

і з рівняння (3.133) отримаємо, що

$$z_k(t_k) = z_{k+1}(t_k) = 2\pi \sum_{i=1}^k \sigma_i^2 \ln \frac{\sigma_{k+1}^2}{\sigma_i^2}, \quad k = 1, \dots, n-1, \quad (3.140)$$

а потім з (3.136)

$$z_k^2(t) = \left[2\pi \left(\sum_{i=1}^k \sigma_i^2 \ln \sigma_{k+1}^2 \right) \right]^2 + 4\pi \left(\sum_{i=1}^k \sigma_i^2 \right) \int_{t_{k-1}}^t L(\tau) d\tau. \quad (3.141)$$

Отримали такий вираз для стратегії пошуку:

$$\lambda_0(t) = \frac{L(t)}{z_k(t)}, \quad t \in [t_{k-1}, t_k]. \quad (3.142)$$

Позначимо кількість пошукових зусиль, яке накопичилося за час $(0, t)$ на аномалії $\exp\left(-\frac{(x-x_l)^2}{2\sigma_l^2}\right)$ через $\varphi_l(x, t)$, тоді має місце співвідношення

$$\varphi_l(x, t) = \int_{t_{k-1}}^t \frac{L(\tau) d\tau}{\sqrt{A_k + 4\pi \left(\sum_{l=1}^k \sigma_l^2 \right) \int_{t_{k-2}}^t L(\bar{\tau}) d\bar{\tau}}}, \quad (3.143)$$

де $t_1(x)$ – момент часу, коли площа кола

$$\left\{ x : \frac{1}{2\pi m \sigma_{k+1}^2} \exp\left(-\frac{(x-x_1)^2}{2\sigma_1^2}\right) \geq C(t) \right\}$$

досягає розміру $\pi(x-x_l)^2$. За допомогою (3.141) отримаємо вираз для пошукового зусилля:

$$\varphi_l(x, t) = \frac{1}{2\sigma_l^2} \left[\frac{1}{\pi} z_{lk}(t) - (x-x_l)^2 \right], \quad (3.144)$$

де

$$z_{lk} = -2\pi\sigma_l^2 \frac{\sum_{\substack{u=1 \\ u \neq l}}^k \sigma_u^2 \ln \frac{\sigma_l^2}{\sigma_u^2}}{\sum_{j=1}^k \sigma_j^2} + \frac{\sigma_l^2}{\sum_{u=1}^k \sigma_u^2} z_k(t), \quad (3.145)$$

$$l \leq k, \quad z_{uk} = 0, \quad u = \overline{k+1, n}.$$

Якщо $\varphi_l(x, t_k + 0) > 0$, $\varphi_l(x, t_k - 0) > 0$, $\varphi_l(x, t_k + 0) - \varphi_l(x, t_k - 0) \neq 0$, то це означає, що в момент часу, коли коло аномалії $\exp\left[-\frac{(x - x_k)^2}{2\sigma_k^2}\right]$ починає збільшуватися від якоїсь точки, кінцева частина функції $L(t)$ розташовується на вершині або екстремумі даної аномалії.

Отже, для ідентифікації виявленої радіаційної аномалії як радіаційного ознаки загоряння в радіаційно-забрудненому лісовому масиві необхідно його додаткове обстеження: фіксація зростання аномалії або наявність іншого, наприклад, інфрачервоного або телевізійного (візуального) підтвердження спалаху.

Таким чином, граничні умови задачі своєчасного виявлення джерела загоряння в радіаційно-забрудненому лісовому масиві з використанням безпілотних літальних апаратів визначають наступні три положення: 1) час пошуку джерела загоряння обмежено часом перебування літальних апаратів в повітрі; 2) висота і швидкість польоту літальних апаратів повинна забезпечувати максимальну дальність виявлення об'єкта пошуку і найбільшу ширину смуги перегляду уздовж маршруту польоту; 3) для ідентифікації виявленої радіаційної аномалії як радіаційного ознаки загоряння в радіаційно-забрудненому лісовому масиві необхідно підтвердження її розвитку додатковими класифікаційними ознаками, які отримуються від інших каналів виявлення або в результаті додаткового обстеження.

3.4 Математична модель запобігання надзвичайним ситуаціям природного і терористичного характеру, викликаним пожежами радіоактивно-забруднених лісових масивів

Головна ідея запобігання надзвичайним ситуаціям, викликаним пожежею радіоактивно-забрудненого лісового масиву, полягає в тому, щоб своєчасно виявити джерело загоряння шляхом виявлення радіаційних провісників [147-151]. 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.

Як було розглянуто раніше в п. 3.1, ймовірність виявлення визначається співвідношенням (3.8), а саме:

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

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.

У наведеній раніше постановці завдань перша початкова умова враховує, що пошук здійснюється в двохкоординатній системі. Для обліку другого початкової умови, що складається в тому, що джерело загоряння нерухоме і розвивається, збільшуючи свої геометричні розміри і змінюючи фізичні характеристики, що впливають на його виявлення, використовуємо формулу (3.25), отриману з (3.8), тобто:

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

де T – заданий час пошуку або рішення пошукової задачі.

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

одного боку, отримаємо (3.27), а з іншого, виконуємо третю початкову умову, враховуючи, що пошукове устаткування недосконале і вимагає залучення хоча б одну людину-оператора пошукової системи:

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

Пошукове зусилля обчислюється із (3.106) через функцію загального вигляду $L(t)$ за умови, що $0 < l < \infty$, і існує інтеграл $\int_0^t L(\tau) d\tau$ для всіх $t > 0$, при

цьому

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

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 стратегія 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, отримуємо (3.144):

$$\varphi(x,t) = \frac{1}{2\sigma\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{(x-x_l)^2}{2\sigma_l^2}\right),$$

де $x - x_l$ – протяжність (радіус) радіоактивної аномалії;

σ – дальність реєстрації радіоактивної аномалії основним каналом виявлення;

σ_l – дальність реєстрації радіоактивної аномалії додатковим каналом виявлення.

Цей вислів дозволяє врахувати, що:

1) час вирішення задачі пошуку джерела загоряння обмежено часом перебування літальних апаратів в повітрі;

2) висота і швидкість польоту літальних апаратів повинна забезпечувати максимальну дальність виявлення об'єкта пошуку і найбільшу ширину смуги перегляду уздовж маршруту польоту;

3) необхідність додаткового каналу виявлення для ідентифікації виявленої радіаційної аномалії як радіаційної ознаки загоряння радіаційного лісового масиву.

Необхідно також враховувати, 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_l додатковим каналом виявлення. У даних умовах маємо залежності:

$$\sigma = f(V, H) \quad \text{и} \quad \sigma_l = f_l(V, H).$$

Узагальнюючи все вище викладене, отримуємо систему з трьох залежностей, яка є шуканою математичною моделлю запобігання надзвичайним ситуаціям природного і терористичного характеру, викликаним пожежами радіоактивних лісових масивів при заданих початкових і граничних умовах, тобто

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

Таким чином, математична модель запобігання надзвичайним ситуаціям природного і терористичного характеру, 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.

РОЗДІЛ 4

МЕТОДИКА ПРОГНОЗУВАННЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ, ВИКЛИКАНИХ ПОЖЕЖАМИ РАДІОАКТИВНО-ЗАБРУДНЕНИХ ЛІСІВ УКРАЇНИ З ВИКОРИСТАННЯМ РОЗВІДУВАЛЬНИХ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Для вирішення четвертої задачі дисертаційного дослідження розглянемо можливість розвідувальних безпілотних літальних апаратів, поставлених в Збройні Сили Міністерства Оборони України і в Міністерство Внутрішніх Справ України, і елементи їх тактичного використання, опишемо розроблену методику прогнозування надзвичайних ситуацій, викликаних пожежами радіоактивно-забруднених лісових масивів України з використанням розвідувальних безпілотних літальних апаратів [152].

4.1 Можливості розвідувальних безпілотних літальних апаратів

З усього різноманіття безпілотних літальних апаратів, наявних в даний час в Україні, за основу візьмемо один зразок, який далі будемо називати як Х. Безпілотний літальний апарат Х (БПЛА Х) складається на озброєнні військово-повітряних сил США. Він зроблений за стелс-технології із застосуванням пластиків і полімерних матеріалів і призначений для ведення розвідувальних і пошукових рятувальних операцій. Кілька одиниць таких БПЛА Х поставлені в Україну. Їх головна перевага полягає в тому, що конструкція планера, виконана в формі літаючого крила, дозволяє використовувати його в складних гідрометеорологічних умовах (при опадах, в тому числі, зливових, і силі вітру до 12-15 м/с). Крім цього, система управління, встановлена на ньому, дозволяє використовувати його в якості керованого ретранслятора і управляти польотом ще кількох літальних апаратів.

Стеля або максимальна висота, на яку може підніматися БПЛА Х – 15 200 м. Мінімальна висота польоту, на якій БПЛА Х 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. 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.

Швидкість польоту БПЛА Х: максимальна – 900 км/год, мінімальна – 12 км/год. 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.

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.

БПЛА X має п'ять систем освітлення обстановки: оптоелектронну, інфрачервону, радіаційну, магнітоелектричну і пасивну радіолокаційну. Телевізійна або оптоелектронна система спостереження є основною. Вона забезпечує дискретний перегляд всієї нижньої півсфери простору і 24 кратне збільшення візуальних образів. Аналогічним чином працює і інфрачервона система спостереження. Системи радіаційного і магнітоелектричного спостереження забезпечують реєстрацію в змінах, відповідно, радіаційного і магнітного фону місцевості. Пасивна радіолокаційна система спостереження забезпечує реєстрацію радіолокаційних сигналів міліметрового, сантиметрового і дециметрового діапазонів в передній і задній півсферах спостереження.

Всі системи спостереження характеризується трьома параметрами:

- 1) найбільшою або максимальною дальністю виявлення об'єкта пошуку;
- 2) кутами одночасного перегляду простору, які забезпечують ширину смуги, що переглядається, уздовж маршруту польоту;
- 3) можливістю додаткової ідентифікації, яка може здійснюватися як розворотом камери оптоелектронної системи, так і використанням інших каналів спостереження, розміщених на літальному апараті, як і інших пошукових одиниць.

Смуга простору, що переглядається, буде забезпечуватися, з одного боку, розкритом (кутами огляду) пошукової системи, а з іншого – висотою польоту БПЛА X. У той же час висота польоту буде залежати як від чутливості реєструючих пристроїв, так і від контрастності об'єкта пошуку в порівнянні з фоном.

Таким чином, розвідувальні безпілотні літальні апарати X, що надійшли в Україну, можуть використовуватися для запобігання надзвичайним ситуаціям природного і терористичного характеру, викликаних пожежами в радіоактивно-забруднених лісових масивах, шляхом своєчасного виявлення джерел загоряння.

4.2 Методика прогнозування надзвичайних ситуацій, викликаних пожежами радіоактивно-забруднених лісів України, з використанням розвідувальних безпілотних літальних апаратів

Методика прогнозування НС, викликаних пожежами в радіоактивно-забруднених лісових масивах України, з використанням розвідувальних безпілотних літальних апаратів, як і будь-яка інша методика, передбачає послідовне виконання певних процедур. Розглянемо їх.

4.2.1 Визначення контрольованого району

Строго кажучи, це визначення району, в межах якого буде здійснюватися пошук джерела загоряння. Оскільки лісовий масив може розташовуватися на площі в десятки і сотні тисяч квадратних кілометрів, то необхідно проводити районування лісового масиву.

Під районуванням розуміють поділ лісового масиву на ділянки або райони за пріоритетами пошуку, який в даному випадку визначається пожежною

небезпекою (за статистичними параметрами, по радіаційному фону, за вказівкою старших начальників, вимогам місцевих органів влади та іншими критеріями).

Для отриманих в результаті такого поділу ділянок лісу встановлюється порядок і періодичність обстеження, відповідно до якої частина районів повинна обстежитися щодня, інша – з періодичністю в 2-3 дня, третя обстежується 1-2 рази в тиждень. Іншими словами, визначення контрольованого району складається в чіткому завданні кордонів польоту безпілотних літальних апаратів, площа якого буде дорівнює Ω .

4.2.2. Організація пошукової системи безпілотних літальних апаратів

Ця процедура передбачає визначення засобів, що беруть участь в пошуку, порядку їх використання і організацію управління.

Особливість БПЛА X полягає в тому, що найбільший ефект їх застосування досягається при використанні двох і більше літальних апаратів. Один з них піднімається на максимальну висоту і використовується як ретранслятор, а другий (або група БПЛА) на малих і понад малих висотах здійснює пошук на віддаленнях, які в десятки разів перевищують дальність видимого горизонту.

Мобільний пост управління, розміщений на спеціальному автомобільному контейнері, обладнаний трьома парними робочими місцями, призначеними для управління БПЛА X. Кожне парне робоче місце передбачає прилади для керування літальним апаратом (оператор-пілот) і прилади для управління бортовими системами спостереження БПЛА X.

Апарат, який виконує пошук на малих висотах, може здійснювати політ на автопілоті і маневрувати по заздалегідь запланованою програмою і переходити на керований режим польоту при виявленні об'єкта пошуку.

БПЛА X, що виконує роль ретранслятора, також веде панорамне висвітлення обстановки і супроводжує політ пошукового апарату, як показано на рис. 4.1.

Можлива й інша організація пошукової системи. Наприклад, обидва БПЛА X після зльоту в автономному режимі здійснюють потайний переліт в район пошуку, після чого один піднімається вгору і, встановивши зв'язок з мобільним постом управління, починає забезпечувати управління пошуковим апаратом.

Після закінчення пошуку обидва БПЛА X набирають висоту, що забезпечує стійкий зв'язок з мобільним постом управління, виконують заходження і здійснюють посадку на злітно-посадкову смугу.

4.2.3 Розрахунок очікуваних відстаней виявлення бортових пошукових систем

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

$$I_c \geq \delta I_n, \quad (4.1)$$

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.

Корисний сигнал, тобто радіаційне або теплове випромінювання, поширюються по циліндричному і сферичному законам, які визначається двома факторами, а саме: геометричними розмірами джерел випромінювання і відстанями, на які ці випромінювання поширюються. Якщо ці параметри рівномірні, то працює циліндричний закон. Якщо відстань, на який поширюється звук, набагато більше, ніж розміри його джерела, то джерело вважається

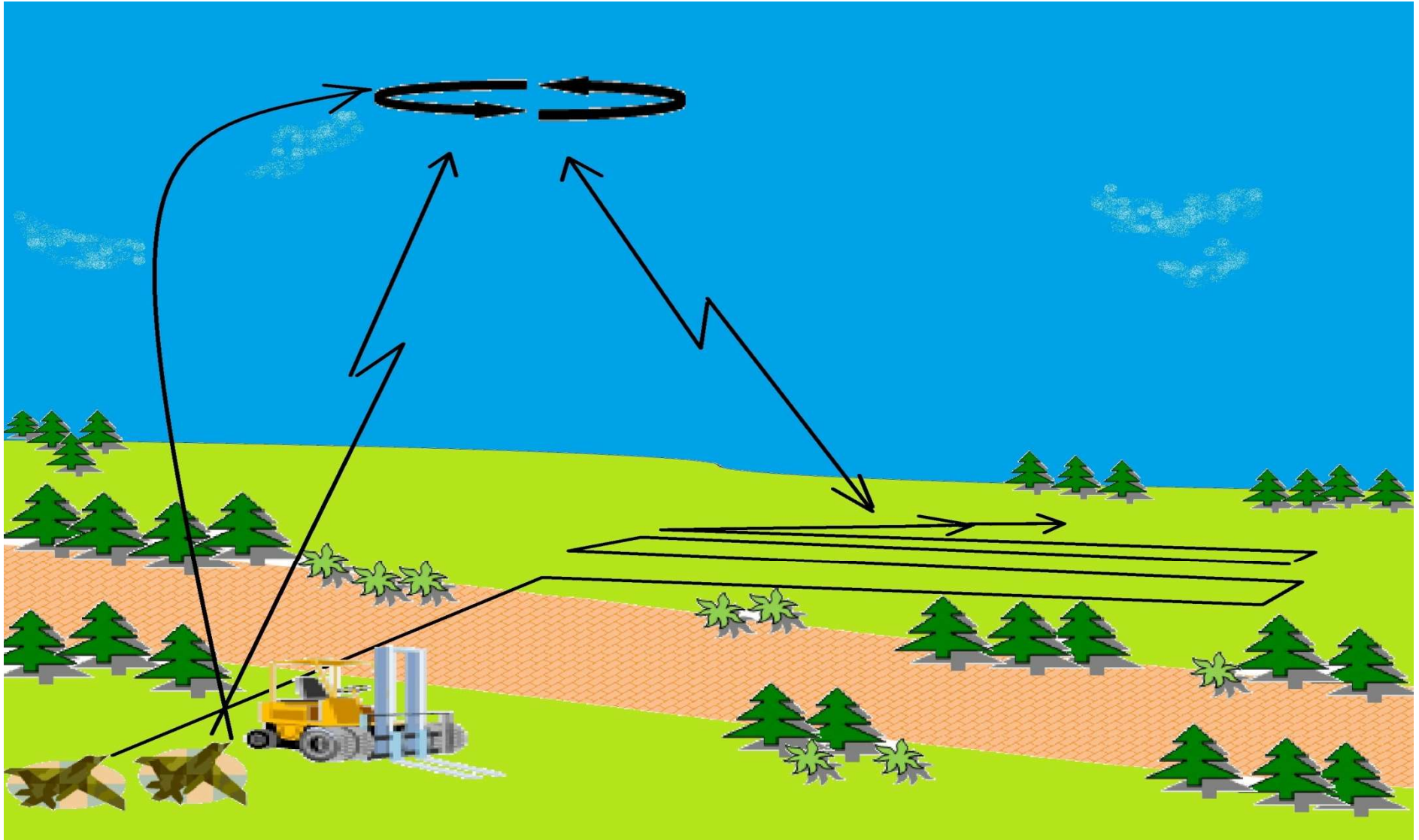


Рис. 4.1 – Схема використання БПЛА

точковим, а поширення випромінювання відбувається по сферичному закону.

У першому випадку фронт хвилі розширюється як стінки циліндра, і інтенсивність випромінювання зменшується пропорційно відстані.

У другому випадку фронт хвилі розширюється як поверхня сфери, і інтенсивність випромінювання зменшується пропорційно квадрату відстані.

У нашому випадку, особливо на ранніх стадіях загоряння, працює сферичний закон. Крім цього, 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, може бути збільшена на величину j_u , яка визначається спрямованим дією джерела. Коли випромінювання буде поширюватися в півсфері, коефіцієнт концентрації джерела j_u буде дорівнює 2. Аналогічним чином буде зменшено вплив перешкоди за рахунок спрямованих дій детектора, який буде визначатися коефіцієнтом його концентрації j_{np} .

З урахуванням усього вищевикладеного, отримаємо співвідношення

$$\frac{P_c^2 j_u}{4\pi \bar{A}^2} \cdot 10^{-0,1\alpha \bar{A}} \geq \delta \frac{P_n^2}{j_{np}}. \quad (4.2)$$

Виконавши логарифмування і множення на 10 обох частин висловлювання (4.2) (переклад в децибельну форму), отримаємо:

$$-\left(20\lg\left(\frac{D}{D_0}\right) + \alpha D + 10\lg 4\pi\right) \geq 10\lg \delta + 20\lg\left(\frac{P_n}{P_0}\right) - 20\lg\left(\frac{P_c}{P_0}\right) - 10\lg j_u - 10\lg j_{np}. \quad (4.3)$$

Тут D_0 – нульовий рівень дистанції, рівний одному метру, а P_0 – поріг виявлення приймального пристрою. Оскільки ці значення є стандартними для приймальних пристроїв, їх в наступних записах вживати не будемо.

Ліва частина виразу $20\lg D + \alpha D + 10\lg 4\pi$ є закономірність спаду інтенсивності випромінювання в стандартній (однорідної і безмежної) атмосфері. Права частина виразу (4.3) прийнято називати енергетичним потенціалом приймального пристрою (з коефіцієнтом спрямованої дії приймальної системи j) по певній цілі (з наведеним значенням перешкод до смуги приймального пристрою P_c) в конкретній заводовій обстановці (рівнем місцевого фону випромінювання в смузі приймального пристрою P_n).

Найбільше значення дистанції D , при якому досягається рівність обох частин, є найбільшою дальністю виявлення сигналу даного виду випромінювання (радіаційного, теплового, магнітного).

Іншими словами, дальністю виявлення випромінювання пошуковою системою є відстань, при якому досягається рівність закономірності спаду інтенсивнос-

ті випромінювання в стандартній атмосфері і енергетичного потенціалу певного приймального пристрою по конкретній цілі (об'єкту пошуку) в заданій заводовій обстановці.

Оскільки розкривши бортових пошукових систем дорівнює 90° (45° лівого і правого борту відповідно), то смуга, що переглядається, буде дорівнювати $0,7 \cdot D$, а при гарантованому виявленні коефіцієнт (ймовірність) контакту складає $0,8-0,9$ за рахунок досить високої швидкості руху літального засобу пошуку. Тому для ідентифікації аномалії, як об'єкта пошуку, необхідно певний час (рис. 4.2).

У цьому випадку коефіцієнт (ймовірність) пропуску об'єкта пошуку буде дорівнює $0,1-0,2$, і ширина переглядається смуги з одного борту складе $0,5 \cdot D$. Відповідно, загальна ширина смуги, що переглядається, буде дорівнювати найбільшій дальності виявлення.

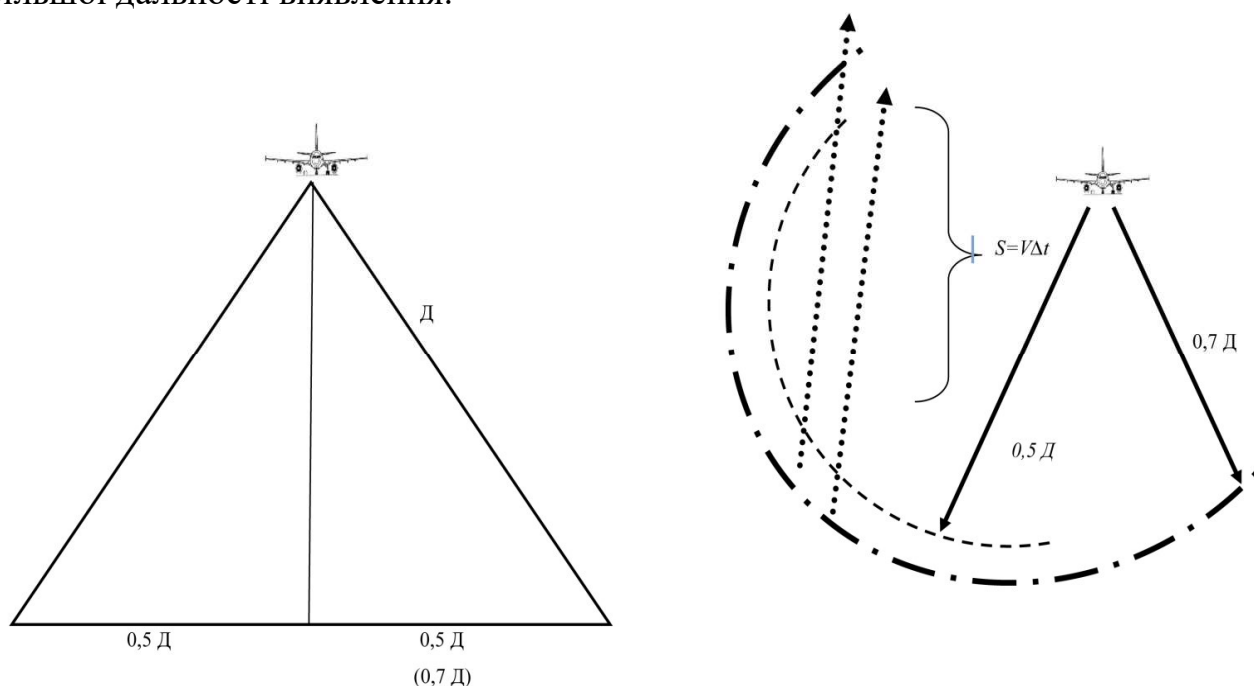


Рис. 4.2 – Схема, яка пояснює формування ширини смуги, що переглядається

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

4.2.4 Визначення загального часу пошуку і його дискретизація

Знаючи пошукове зусилля одного БПЛА X та їх загальне число, отримаємо пошукове зусилля u всій 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 менше проміжку часу t – максимального часу перебування БПЛА X в повітрі, так і більше. У першому випадку весь контрольований район про-

глядається 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.

4.2.5 Організація пошуку джерела загоряння

Результати районування за пріоритетами, визначені у п. 4.2.1, 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.

Плановий пошук здійснюється шляхом послідовного обстеження району пошуку. Він може виконуватися паралельними гаслами, як показано на рис. 4.3, при цьому необхідно враховувати напрямок приземного вітру.

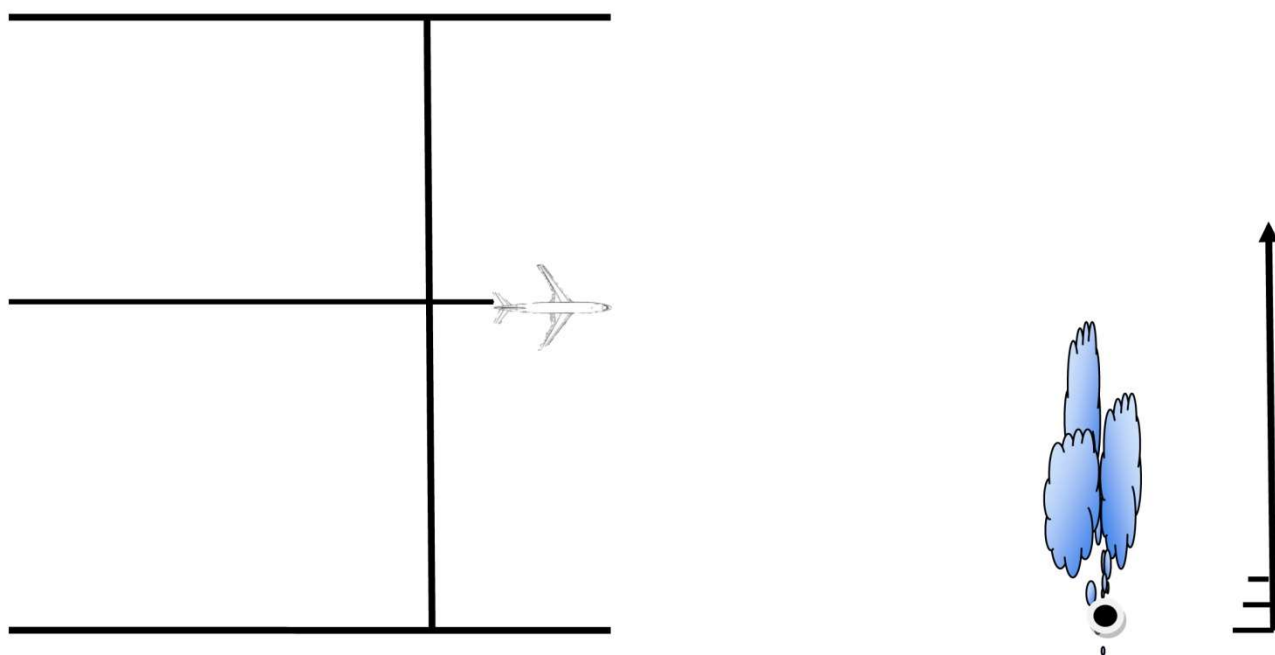


Рис. 4.3 – Схема, яка пояснює облік напрямку приземного вітру

У разі, коли галси розташовуються ортогонально напрямку вітру, геометричні розміри цілі збільшуються, тому ймовірність її виявлення зростає.

Послідовне обстеження району при плановому пошуку може також виконуватися по спіралі що сходиться або розходиться, як показано на рис. 4.4.

Оперативний пошук виконується у випадках, коли необхідно виявити не тільки джерело загоряння, а й зловмисників, які організовують підпал.

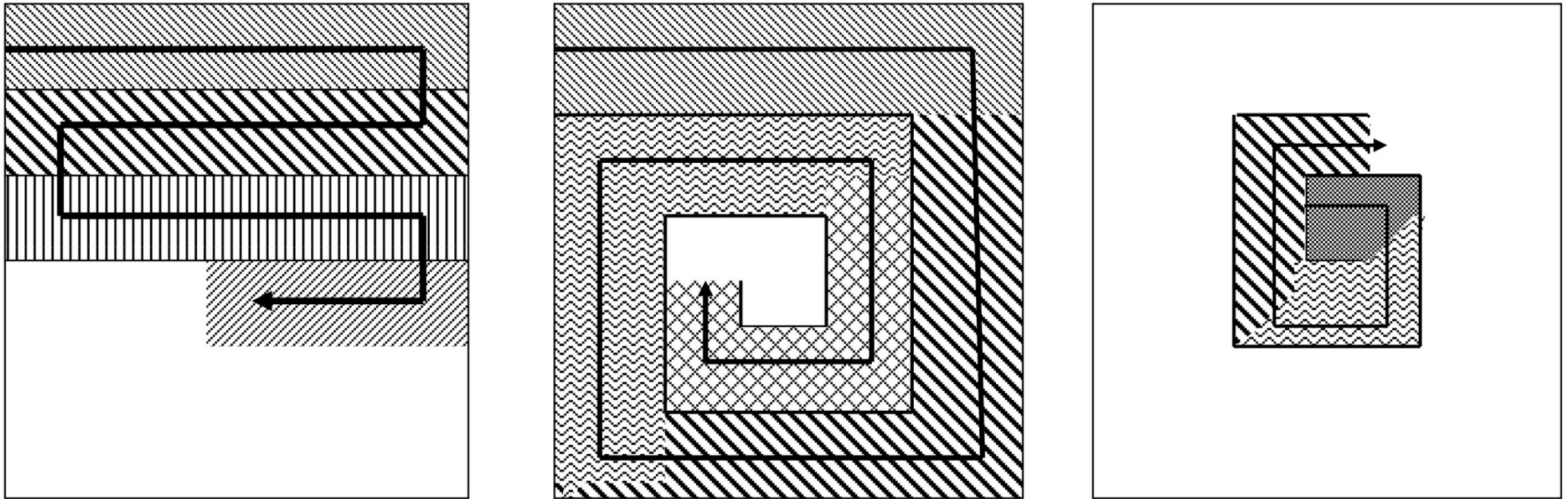


Рис. 4.4 – Схема послідовного обстеження району при плановому огляді: паралельними гаслами; за збіжною спіраллю; за розбіжною спіраллю

Очевидно, що зловмисники будуть намагатися покинути смугу виявлення і перейти в місце, яке вже було обстежено, тому при організації оперативного пошуку використовується незакономірний (хаотичне, певне випадковим чином) маневрування БПЛА X, як показано нарис. 4.5.

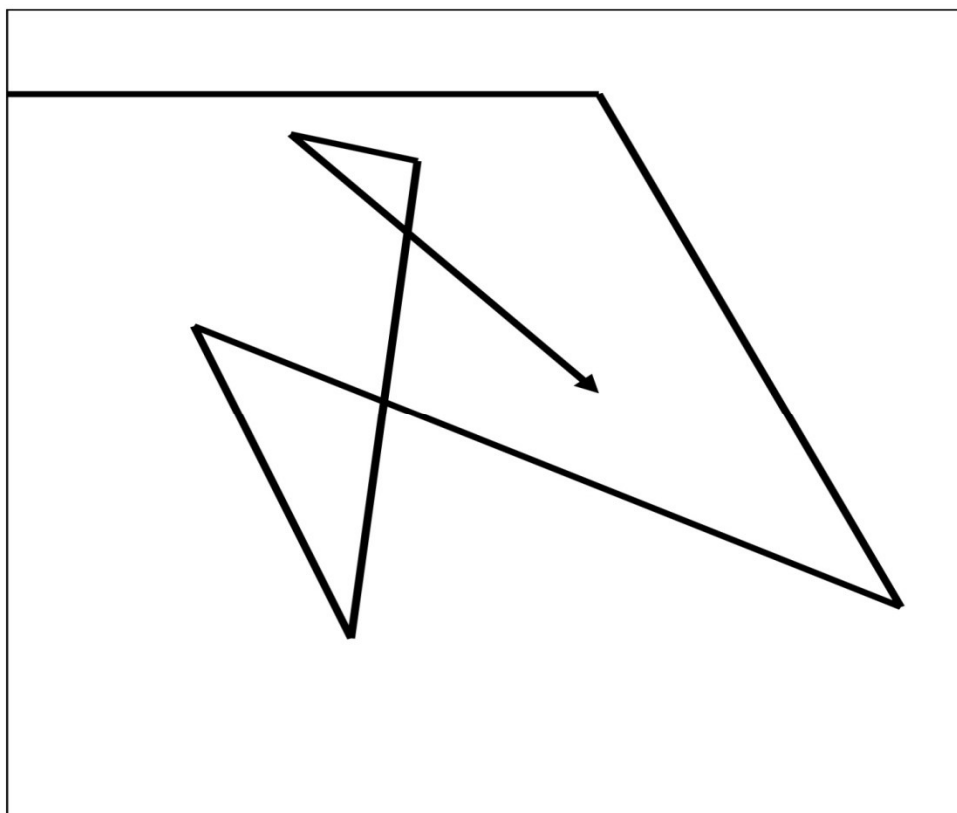


Рис. 4.5 – Схема проведення оперативного пошуку

При такому маневруванні літальний апарат може неодноразово повертатися в смугу, яку вже обстежив, що сприяє виявленню зловмисників, що ухиляються від виявлення.

Пошук за викликом проводиться в тому випадку, коли з'являється інформація про спалах в лісовому масиві, який необхідно перевірити. БПЛА X, як показано на схемі рис. 4.6, слідує в точку з координатами, де повинно бути передбачуване джерело займання, а потім обстежує район.

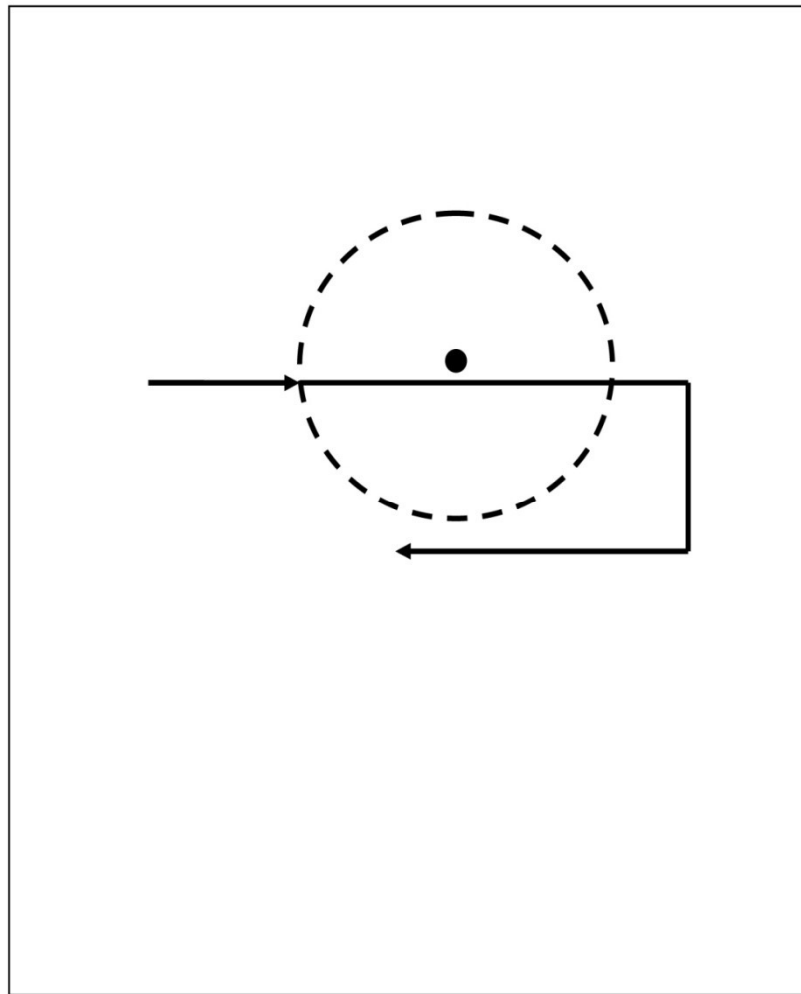


Рис. 4.6 – Схема проведення пошуку за викликом (коло можливих помилок) ймовірного місця передбачуваного джерела загоряння

При організації пошуку також необхідно враховувати пріоритети обстеження районів контрольованого лісового масиву. На схемі рис. 4.7 зображені райони (квадрати), кожен з яких має своє позначення. Перша цифра - номер рядка, друга цифра – номер стовпця.

На схемі також вказано пріоритет районів патрулювання БПЛА X в контрольованому гіпотетичному лісовому масиві. Перший пріоритет, коли обстеження повинно виконуватися щодня. Другий пріоритет, коли обстеження повинно виконуватися не менше 2-3 разів на тиждень, тобто через день. Третій пріоритет, коли обстеження повинно проводитися не менше 12 разів на тиждень, тобто через три дні.

	1		2		3	
1	1.1	①	1.2	②	1.3	③
2	2.1	①	2.2	②	2.3	③
3	3.1	①	3.2	②	3.3	③

Рис. 4.7 – Схема районів контрольованого гіпотетичного лісового масиву

Виходячи з цього, формується графік виконання польотних завдань, приклад якого наводиться нижче.

- 1 день – райони 1.1; 2.1; 3.1; 1.2; 2.2; 1.3.
- 2 день – райони 1.1; 2.1; 3.1; 3.2; 2.3; 3.3.
- 3 день – райони 1.1; 2.1; 3.1; 1.2; 2.2; 3.3.
- 4 день – райони 1.1; 2.1; 3.1; 1.3; 2.3; 3.2.
- 5 день – райони 1.1; 2.1; 3.1; 1.2; 2.2; 1.3 и т. д.

Відповідно до графіка виконання польотних завдань проводиться розрахунок ймовірності виявлення джерела загоряння в контрольованому лісовому масиві.

4.2.6 Розрахунок ймовірності виявлення джерела загоряння

Він проводиться в такому порядку:

- 1) розраховується пошукова продуктивність БПЛА X як добуток дальності виявлення радіаційного передвісника загоряння на швидкість його польоту;
- 2) обчислюється зусилля пошукової системи як відношення добутку пошукової продуктивності на час обстеження району пошуку до добутку площі району на кількість годин у добі;

3) розраховується ймовірність виявлення джерела загоряння в районі пошуку як різниця одиниці і експоненти в негативному ступені, який чисельно рівний зусиллю пошукової системи;

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

5) знаходиться ймовірність виявлення джерела загоряння протягом часу рішення задачі пошуку, наприклад, протягом всього пожежонебезпечного періоду, як сума ймовірностей виявлення джерел загоряння за все доби, під час яких здійснювався контроль лісового масиву БПЛА X.

Стосовно до гіпотетичного лісового масиву, зображеного на рис. 4.7, і графіку виконання польотних завдань БПЛА X, описаного в п. 4.2.5, 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 рішення задачі пошуку складе 0,47.

Таким чином, методика прогнозування надзвичайних ситуацій, викликаних пожежами в радіоактивно-забруднених лісах України, 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.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Список радиационных аварий. – Википедия. Доступ: https://ru.wikipedia.org/wiki/список_радиационных_аварий
2. АЭС Три-Майл-Айленд. – Википедия. Доступ: https://ru.wikipedia.org/wiki/авария_на_три_майл_айленд
3. Three Mile Island, Unit 1. Fact Sheet. Exelon. – 2012. – 21 p.
4. Three Mile Island, Unit 2. Fact Sheet. Exelon. – 2012. – 24 p.
5. Pennsylvania Nuclear Profile. Energy information administration. – 2010. – 12 p.
6. Pressurized water reactor systems. Reactor concepts manual. Nuclear regulatory commission. – 1980. – 201 p.
7. Westinghouse world view. Westinghouse electric company. April, 2005. – 28 p.
8. L. Taylor. TMI fuel characteristics for disposal critically analysis. Idaho national laboratory. United States Department of Energy. September, 2003. – 198 p.
9. World Nuclear association: Three Mile Accident. Input: <https://www.world-nuclear.org/info/inf36.html>
10. J. Samuel Walker. Three Mile Island: A Nuclear crisis in historical perspective. Berkley: University of California Press, 2004. – 231 p.
11. Report of the president's commission of the accident of Three Mile Island. Washington, DC. The Commission, 1979.
12. Rogovin Mitchel. Three Mile Island: A report to the commissioners and to the public. Special injury group, 1980.
13. Fact sheet from the US Nuclear regulatory commission, 1979.
14. US NRC. Input: <http://www.nrc.gov/reactors/power.html>
15. Three Mile Island. Nuclear regulatory commission, 1980.
16. Самойлов О. Б. Безопасность ядерных энергетических установок / О. Б. Самойлов, Г. Б. Усынин, А. М. Бахматов: монография – М.: Энергоатомиздат, 1989 – 280 с.
17. Integrated reliability and risk analysis system basic training course. – NRC, Washington, 1995. – 302 p.
18. Бабаев Н. С. Ядерная энергетика, человек и окружающая среда / Н. С. Бабаев, В. Ф. Демин, Л. А. Ильин: монография. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 314 с.
19. Азаренко Е. В. Оценка эффективности управления чрезвычайной ситуацией / Е. В. Азаренко, Ю. В. Брославский, Ю. Ю. Гончаренко и др. // Сб. науч. трудов СНУЯЭиП, 2012. – Вып. 1 (41). – С. 207 – 211.
20. Чернобыльская АЭС. Доступ: <http://uk.wikipedia.org/wiki.ua>
21. Легасов В. А. Описание Чернобыльской АЭС с реактором РБМК-1000 / Доклад. – 1986. – Часть 1.
22. Легасов В. А. Информация об аварии на Чернобыльской АЭС и ее последствиях, подготовленная для МАГАТЭ / Доклад. – 1986. – Часть 2.

23. Анализ нарушений в работе энергоблоков Минатомэнерго СССР в 1987 году. Рекомендации и мероприятия по повышению надежности и безопасности. – М.: ВНИИ ФЭС, 1988 – 140 с.
24. Кисилев А. Н. Ядерное топливо разрушенного реактора. Москва – Чернобылю. – М.: Воениздат, 1998. – 128 с.
25. Предотвращение развития аварии и уменьшение ее последствий. Борьба с пожаром на АЭС. / Доклад INSAG-1. – 1986. – 240 с.
26. Чорнобильська катастрофа – 20 років. / За редакцією В. Г. Бар'яхтара. – К.: Наукова думка, 1996. – 575 с.
27. Чорнобильська катастрофа – 20 років. / За редакцією Е. В. Соботовича, Г. М. Бондаренка, Г. В. Лисиченка. – К.: Наукова думка, 2006. – 408 с.
28. П'ятнадцять років Чорнобильської катастрофи. Досвід подолання. Збірник. – К.: Консалтинг, 2001. – 380 с.
29. Акт расследования загорания кабелей на четвертом энергоблоке. 26 мая 1986 г.
30. Демидов Н. И. Работа оперативной группы МВД СССР в зоне катастрофы на ЧАЭС. Уроки и выводы. – М.: Воениздат, 1997. – 204 с.
31. Авария на Чернобыльской АЭС: опыт преодоления. Извлеченные уроки / Под ред. А. В. Носовского. – К.: Техника, 2006. – 263 с.
32. Карпон Н. В. Чернобыль. Месть мирного атома. Исторический обзор этапов развития атомной науки и техники. Анализ причин событий Чернобыльской катастрофы. – К.: ЧП «Кантри Лайф», 2005. – 378 с.
33. Губарев В. Н. Зарево над Припятью. – К.: В. школа, 1987. – 212 с.
34. Отчет о состоянии безопасности объекта «Укрытие». – 2008. – 202 с.
35. Чернобыль, Припять, Чернобыльская АЭС и зона отчуждения. Доступ: <http://Chernobyl.in.ua>
36. Ломакін В. Ностальгія. Спогади з Чорнобильської катастрофи. – К.: Наукова думка, 2006. – 197 с.
37. Актуальные проблемы ликвидации медицинских последствий на Чернобыльской АЭС / Материалы укр. научн. конф. // Киев, 21-23 апреля 1992. – К.: МЗ Украины, 1992. – 220с.
38. П'ятнадцять років Чорнобильської катастрофи. Досвід подолання / Матеріали міжнародної конференції. – К.: 2001. – 380 с.
39. Щелкин К. И. Атомный проект СССР, от энергии разрушения к созданию / Материалы международной конференции. – АРК, Щелкино, 2011. – 144 с.
40. Шестопапов В. М. Проблемы оптимального управления безопасностью геологического захоронения радиоактивных отходов / В. М. Шестопапов, В. И. Пампура, Ю. А. Шибецкий. – К.: Альтарт, 2008. – 172 с.
41. АЭС Фукусима-1 – Википедия. Доступ: http://ru.wikipedia.org/wiki/АЭС_фукусима_1
42. Авария на АЭС Фукусима-1. – Википедия. Доступ: http://ru.wikipedia.org/wiki/авария_на_АЭС_фукусима_1

43. World nuclear industry status report, 2014. Input: <http://www.worldnuclearreport.org/IMG/pdf>
44. Roadmap for Fukusima Daiichi restoration. World nuclear news. 18 april 2011.
45. No significant damage to fuel at unit 4. World nuclear news. 30 april 2011.
46. Filters for Fukusima Daiichi. World nuclear news. 6 may 2011.
47. World nuclear industry status report, 2015. Input: http://www.worldnuclearreport.org/the_world_nuclear_industry_status_report_2015/html
48. Над АЭС Фукусима-1 запретили полеты. Lenta.ru. 15 марта 2011
49. Вениаминов Н. Н. Масс-спектрометрическое определение следов урана и тория в аэрозолях, отобранных на российской территории после аварии на японской АЭС Фукусима-1 / Н. Н. Вениаминов, А. В. Смирнов, А. В. Березин, А. Ю. Тарасов // Российский химический журнал, 2012. – Т. LVI. – № 5-6. – С. 87 – 90.
50. Иванов В. К. Радиологические последствия аварии на АЭС Фукусима – окончательное заключение экспертов МАГАТЭ. – М.: Российская научная комиссия по радиологической защите, 2014. – 17 с.
51. Пожар на Угледорской ТЭС уничтожил 4 энергоблока, город остался без тепла и воды. Доступ: http://zn.ua/UKRAINE/pozhar-na-uglegorskoj-tes-unichtozhil-4-energobloka-gorod-ostalsya-bez-tepla-i-vody-119714_.html
52. Пожар на Угледорской ТЭС в Донецкой области. Доступ: <https://www.youtube.com/watch?v=MrBT4dEaXVo>
53. Пожар на Угледорской ТЭС, в котором погибли люди, произошел из-за халатности рабочего. Доступ: http://zn.ua/UKRAINE/stala-izvestna-prichina-pozhara-na-uglegorskoj-tes-v-kotorom-pogibli-lyudi-128574_.html
54. Чрезвычайная ситуация в Светлодарске: На Донетчине взорвалась ТЭС. Доступ: <https://ru.tsn.ua/spetstemi/chrezvychaynaya-situaciya-v-svetlodarske-na-donetchine-vzorvalas-tes-298783.html>
55. Названы причины пожара на Угледорской ТЭС. Доступ: <https://www.pravda.com.ua/rus/news/2013/04/16/6988301/>
56. Названа причина пожара на Угледорской ТЭС. Доступ: <http://from-ua.com/news/267095-nazvana-prichina-pozhara-na-uglegorskoi-tes.html>
57. У Азарова назвали причины пожара на угледорской ТЭС. Доступ: <https://ru.tsn.ua/ukrayina/u-azarova-nazvali-prichiny-pozhara-na-uglegorskoj-tes-301302.html>
58. Авария произошла на "Азоте". Доступ: <http://cxid.info/avariya-proizoshla-na-azote-n1764>
59. На Северодонецком заводе произошла авария на газопроводе и пожар. Доступ: <https://ru.tsn.ua/ukrayina/na-severodoneckom-zavode-proizoshla-avariya-na-gazoprovode-i-pozhar.html>
60. Авария Северодонецк Азот.3gp. Доступ: https://www.youtube.com/watch?v=51mA_jhBNUc

61. На Северодонецком «азоте» произошла серьезная авария. Доступ: http://www.chemport.ru/chemprodnews_5438.html

62. Авария на Северодонецкой ТЭЦ: в 20-градусный мороз жилые дома остались без отопления. Доступ: <http://kp.ua/incidents/485498-avaryia-na-severodonetskoj-tets-v-20-hradusnyi-moroz-zhylye-doma-ostalys-bez-otopleniya>

63. Пожар в Чернобыльском лесу заставил снова достать дозиметры. Доступ: <https://ru.tsn.ua/video/video-novini/pozhar-v-chernobylskom-lesu-zastavil-snova-dostat-dozimetry.html>

64. Пожар в Чернобыльском лесу. Доступ: <http://www.mariupolnews.com.ua/descr/56319>

65. В Чернобыльской зоне горит 130 га леса: спасатели борются с огнем. Доступ: <http://news.bigmir.net/ukraine/912836-V-Chernobyl-skoj-zone-gorit-130-ga-lesa--spasateli-borjutsja-s-ognem->

66. Крупный лесной пожар бушует в зоне, вплотную примыкающей к Чернобыльской атомной станции. Доступ: <https://www.1tv.ru/news/2015/06/30/20310-krupnyu-lesnoy-pozhar-bushuet-v-zone-vplotnuyu-primykauschey-k-chernobylskoy-atomnoy-stantsii>

67. Пожар в лесу под Чернобылем. РИА Новости Украина. Доступ: <http://rian.com.ua/video/20150630/369759072.html>

68. В зоне Чернобыльской АЭС бушует лесной пожар. Доступ: https://www.youtube.com/watch?v=f4_PnXm1HCg

69. Пожар в Чернобыльском лесу. Доступ: <http://kot-pafnusha.livejournal.com/690152.html>

70. В зоне отчуждения Чернобыльской АЭС вспыхнул лесной пожар. Доступ: <https://lenta.ru/news/2016/07/17/chernobyl/>

71. В Чернобыльской зоне горит лес: в соцсетях советуют закрывать окна. Доступ: <http://kiev.segodnya.ua/kaccidents/v-chernobylskoy-zone-gorit-les-v-socsetyah-sovetuyut-zakryvat-okna-734255.html>

72. В Чернобыльской Зоне отчуждения тушат лесной пожар на площади 15 га. Доступ: http://censor.net.ua/photo_news/397714/v-chernobylskoyi-zone-otchujdeniya-tushat-lesnoyi-pozhar-na-ploschadi-15-ga-goschs-foto

73. «Горячая хроника» новобогдановских взрывов. Доступ: <http://www.mv.org.ua/news/3884-gorjachaja-hronika-novobogdanovskih-vzryvov.html>

74. На Украине в результате пожара снаряды "Град" рвутся в 4 украинских селах: много жертв. Доступ: <http://www.newsru.com/world/06May2004/skladi.html>

75. На Украине рвутся снаряды и гибнут люди. Доступ: <https://utro.ru/articles/2004/05/07/305321.shtml>

76. Новобогдановка. Жизнь после взрывов. Доступ: <http://podrobnosti.ua/127107-novobogdanovka-zhizn-posle-vzryvov.html>

77. Черногор Л. Ф. Геофизические эффекты и экологические последствия пожара и взрывов на военной базе вблизи г. Мелитополь / Л. Ф. Черногор // Геофизический журнал. – 2004. – Т. 26, № 6. – С. 61 – 73.

78. Взрывы артиллерийских складов в Новобогдановке. Доступ: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%>

79. Взрывы в Новобогдановке: хронология событий. Доступ: http://censor.net.ua/news/51819/vzryvy_v_novobogdanovke_hronologiya_sobytyi

80. Взрывы в Новобогдановке. Доступ: <http://old.atn.ua/newsread.php?id=15602>

81. Сидеть за взрывы в Новобогдановке будут солдаты. Доступ: <https://www.obozrevatel.com/news/2008/12/2/271909.htm>

82. 19 августа 2006 года близ села Новобогдановка Запорожской области в третий раз взорвались склады с боеприпасами. Доступ: <http://fakty.ua/137955-19-avgusta-2006-goda-bliz-sela-novobogdanovka-zaporozhskoj-oblasti-v-tretij-raz-vzorvalis-sklady-s-boepripasami>

83. Самые резонансные катастрофы на складах боеприпасов в Украине. Доступ: <http://www.segodnya.ua/criminal/katastrofy-na-skladah-boepripasov-i-voinskih-poligonah-663050.html>

84. Хроника взрывов военных складов в Украине за 15 лет. Доступ: <http://kp.ua/incidents/517526-khronyka-vzryvov-voennykh-skladov-ukrainy-za-15-let>

85. Взрывы в Новобогдановке: причины и следствия. Доступ: <https://ru.tsn.ua/chorna-hronika/vzryvy-v-novbogdanovke-prichiny-i-sledstviya-foto.html>

86. Карта Минобороны со складами боеприпасов: 37 Лозовых и Новобогдановок. Доступ: <http://rus.newsru.ua/arch/29aug2008/ukraine/index.html>

87. Мирошник О. М. Использование модифицированного метода Evomax в информационно-аналитических системах прогнозирования последствий химических аварий / О.М. Мирошник // Вісник Хмельницького національного університет. Серія: Технічні науки. – 2015. – № 1. – С. 263 – 268.

88. Лесные пожары. Методы их профилактики и обнаружения. Доступ: <http://fire-truck.ru/poznavatelno/lesnyie-pozharyi-metodyi-ih-profilaktiki-i-obnaruzheniya.html>

89. Шишалов И. С. Обнаружение лесных пожаров: основные этапы развития. Доступ: <http://www.secuteck.ru/articles2/firesec/obnaryjenie-lesnih-rojarov-osnovnie-etapi-razvitiya/>

90. Абрамов Ю. А. Обнаружение очагов лесных пожаров и прогноз динамики их распространения / Ю. А. Абрамов, В. А. Комяк, В. М. Комяк, В. Е. Россоха. – Харьков: АГЗ Украины, 2004. – 145 с.

91. Современные методы обнаружения и мониторинга лесных пожаров. Доступ: <https://www.google.com/search?source=hp&ei=DpTDWs>

92. Способы обнаружения и тушения природных пожаров. Доступ: <https://fireman.club/statyi-polzovateley/sposoby-obnaruzheniya-i-tusheniya-prirodnyx-pozharov/>

93. Абрамов Ю. О. Моніторинг надзвичайних ситуацій: Підручник / Ю. О. Абрамов, Є. М. Грінченко, О. Ю. Кірючкін, П. А. Коротинський, С. М.

Миронець, В. О. Росоха, В. В. Тютюнник, В. М. Чучковський, Р. І. Шевченко. – Вид.-во АЦЗУ, 2005. – 530 с.

94. Выявление лесных и степных пожаров, методика решения тематической задачи. Доступ: <http://www.casre.kiev.ua/ru/achievements/technologies/61-%D0%B2>

95. Способы обнаружения и тушения природных пожаров. Доступ: <https://ria.ru/nsk/20131111/975853092.html>

96. Нікулін О. Ф. Применение беспилотных летательных аппаратов с синфазной антенной решеткой для систем мониторинга пожаров / О. Ф. Нікулін, О. С. Багров // Вісник АМУ. Серія «Техніка». – 2014. – Вип. 1 (7). – С. 113 – 127.

97. Инженерная экология: Учебник / Под ред. проф. В. Т. Медведева. – М.: Гардарики, 2002. – 687 с.

98. Кочкарь Д. А. Оптимальное размещение вышек наблюдения наземных систем видео-мониторинга лесных пожаров / Д. А. Кочкарь, С. Ю. Мединцев, А. А. Орехов // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – Харків, 2010. – № 7 (48). – С. 311 – 314.

99. Бабий С. М. Алгоритм покрытия площади лесного массива кругами видеонаблюдения и контроля / С. М. Бабий, Д. А. Кочкарь, В. В. Чмовж // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – Харків, 2010. – № 7 (48). – С. 272 – 277.

100. Новая система пожарного мониторинга. Доступ: <http://inform.nstu.ru/print.phpid=564>.

101. Крючков И. И. Мониторинг лесных пожаров из космоса. Проблемы и пути их решения. Доступ: http://science-bsea.narod.ru/2003/les_2003/kruhkov.htm

102. U. S. Wildfires highlight need for a low-cost fire detection and monitoring constellation. Input :<http://www.sst-us.com/u-s-wildfires-highlight-need>

103. Использование данных дистанционного зондирования земли для мониторинга лесных пожаров на территории Украины. Доступ: <http://eco.com.ua/content/ispolzovanie-dannykh-distantsionnogo-zondirovaniya-zemli-dlya-monitoringa-lesnykh-pozharov-n>

104. Коротенко Г. М. Использование данных дистанционного зондирования земли для мониторинга лесных пожаров на территории Украины / Г. М. Коротенко, М. В. Евсюков // Збірник наукових статей III-го Всеукраїнського з'їзду екологів з міжнародною участю". – Вінниця, 2011. – Том.1. – С. 141 – 144.

105. Андрианов Н. Г. Сеть малых космических аппаратов для оперативного обнаружения пожаров / Н. Г. Андрианов, В. Н. Лагуткин, А. П. Лукьянов и др. // Успехи совр. радиоэлектрон. – 2011. – № 8. – С. 42 – 49.

106. Щетинский Е. А. Тушение лесных пожаров. – М.: АО «Лесхозмаш», 1994. – 138 с.

107. Тушение лесных пожаров. Доступ: <http://www.aviales-rkomi.ru/page/157/>
108. Firefighters Guide. Bois Inteiagency Fire Center. Boise USA. 1986. – 70 p.
109. Спутник руководителя тушения лесных пожаров. – М.: АО «Лесхозмаш», 2004. – 104 с.
110. Зинов Г. И. Охрана лесов от пожаров. – М.: Лесн. пром-сть, 2004. – 189 с.
111. La Protection Des Forets Contri Le Feu. Qvebec Canada, 1965. – 240 p.
112. Указания по обнаружению и тушению лесных пожаров. – М.: ЦБНТИ Гослесхоза СССР, 1976. – 110 с.
113. Тушение лесных пожаров. Учебное пособие. Доступ: <http://аосс.ру/wp-content/uploads/downloads/2013/02/МЕТОДИЧКА-по-lesnyim-pozharam-2013.pdf>
114. Лесные пожары: классификация, прогнозирование, организация тушения. Доступ: <http://www.wood.ru/ru/lofire.html>
115. Рекомендации по обнаружению и тушению лесных пожаров. Доступ: <http://www.kemles.ru/files/lenta/30.doc>
116. Яншина Ф. Т. Эволюция взглядов В.И. Вернадского на биосферу и развитие учения о ноосфере. – М.: Наука, 1996. – 229 с.
117. Giri S. P., Shrestha S., Foresman T. W., Singh A. Global biodiversity data and information// <http://www.unescap.org/stat/envstat/stwes-26.pdf>
118. Hengeveld R., Fedonkin M. A. Bootstrapping the Energy Flow in the Beginning of Life// Acta Biotheor, 2007. – Vol. 55. – P. 181 – 226.
119. Остроумов С. А. Гидробионты в самоочищении вод и биогенной миграции элементов. – М.: МАКС Пресс, 2008. – 200 с.
120. Hengeveld R., Fedonkin M. A. Bootstrapping the Energy Flow in the Beginning of Life // Acta Biotheor, 2007. – Vol. 55. – P. 181 – 226.
121. Jaffe L. A., Peucker-Ehrenbrink B., Petsch S. T. Mobility of rhenium, platinum group elements and organic carbon during black shale weathering // Earth and Planetary Science Letters, 2002. – Vol. 198. – P. 339 – 353.
122. Wedepohl K. H. The composition of Earth's upper crust, natural cycles of elements, natural resources / Eds. By E. Merian, M. Anke, M. Ihnat, M. Stoepler // Elements and their Compounds in the Environment. – Vol. 1. – Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA, 2004. – P. 3 – 16.
123. Wedepohl K.H. The composition of the continental crust // Geochim. Cosmochim. Acta, 1995. – Vol. 59. – P. 1217 – 1232.
124. Yablokov A. V., Ostroumov S. A. Conservation of Living Nature and Resources: Problems, Trends, and Prospects. Berlin, New York et al. Springer, 1991. – 272 p.
125. Радиоактивный лесной пожар. Доступ: <https://www.derev-grad.ru/oхрана-lesov-ot-pozharov/radioaktivnyi-lesnoi-pozhar.html>

126. Как спастись от лесных пожаров? Доступ: <https://awesomeworld.ru/prirodnye-yavleniya/lesnoy-pozhar.html>

127. Лесной пожар. Доступ : <https://dic.academic.ru/dic.nsf/stroitel/9313>

128. Физическая модель. Доступ: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0>

129. Качур Т. В. Теоретическое решение задачи защиты людей от поражающих факторов радиоактивного и химического загрязнения атмосферы / Ю. Ю. Гончаренко, О. М. Мирошник, О. А. Высотенко, Т. В. Качур, А. С. Рыжкин // Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах». – Хмельницький: Хмельницький національний університет, 2017. – № 3 (59). – С. 127 – 131.

130. Качур Т. В. Защита объектов критической инфраструктуры от радиоактивного и химического загрязнения атмосферы / Ю. Ю. Гончаренко, Т. В. Качур, О. Н. Мирошник, А. С. Рыжкин // Науково-технічний збірник «Правове, нормативне та метрологічне забезпечення систем захисту інформації в Україні». – Київ: Державна служба спеціального звуку та захисту інформації в Україні НТУУ «КПІ», 2017. – Вип. 1 (33). – С. 31 – 38.

131. Качур Т. В. Подходы к решению теоретической задачи идентификации радиационных целей в интересах предотвращения чрезвычайных ситуаций террористического характера / Е. В. Азаренко, Н. А. Бородина, М. М. Дивизинюк, Т. В. Качур // Збірник наукових праць «Техногенна-екологічна безпека та цивільний захист». – Київ: ДУ «ІГНС НАН України», 2017. – Вип. 7 (1). – С. 12 – 17. – Інв. № 57.

132. Гончаренко Ю. Ю. Структура контура управления информационной безопасностью предприятия / Ю. Ю. Гончаренко // “Экономика и управление”. – № 5. – Симферополь: НАПКС, 2012. – С. 97 – 101.

133. Гончаренко Ю. Ю. Этапы развития чрезвычайной ситуации, вызванной загрязнением водной среды нефтепродуктами / Ю. Ю. Гончаренко, М. М. Дивизинюк, А. Н. Фурсенко и др. // Сб. науч. тр. СНУЯЭиП. – Вип. 2 (34). – Севастополь: СНУЯЭиП, 2010. – С. 83 – 87.

134. Гончаренко Ю. Ю. Особенности описания чрезвычайных ситуаций, вызванных нефтяным загрязнением водной среды / Ю. Ю. Гончаренко, Ю. В. Браславский, Е. В. Азаренко и др. // Сб. науч. тр. СНУЯЭиП. – Вип. 3 (35). – Севастополь: СНУЯЭиП, 2010. – С. 215 – 220.

135. Качур Т. В. Инженерно-технический метод защиты людей от поражающих факторов чрезвычайных ситуаций, вызванных загрязнением атмосферы радиоактивными и отравляющими веществами на открытой местности / Е. В. Азаренко, Н. А. Бородина, Ю. Ю. Гончаренко, М. М. Дивизинюк, Е. Д. Желяк, Т. В. Качур, О. Н. Мирошник, А. С. Рыжкин, А. П. Фесай // Збірник наукових праць «Техногенна-екологічна безпека та цивільний захист». – 2017. – №12. – С. 5 – 13.

136. Качур Т. В. Инженерно-технический метод защиты людей от поражающих факторов чрезвычайных ситуаций, вызванных загрязнением атмосферы радиоактивными и отравляющими веществами в населенных пунктах / Е. В. Азаренко, Н. А. Бородина, Ю. Ю. Гончаренко, М. М. Дивизинюк, Е. Д.

Желяк, Т. В. Качур, О. Н. Мирошник, А. С. Рыжкин, А. П. Фесай // Збірник наукових праць «Техногенна-екологічна безпека та цивільний захист». – 2017. – № 13. – С. 14 – 22.

137. Качур Т. В. Разработка математической модели радиационного обнаружения и идентификации людей и других опасных целей на подходах к охраняемым объектам критической инфраструктуры в интересах предотвращения чрезвычайных ситуаций террористического характера / С. В. Лазаренко, М. М. Дивизинюк, Т. В. Качур // Збірник наукових праць «Техногенна-екологічна безпека та цивільний захист». – Київ: ДУ «ІГНС НАН України», 2017. – Вип. 8 (2). – С. 52 – 59. – Інв. № 58.

138. Качур Т. В. Некоторые аспекты прогнозирования чрезвычайных ситуаций на объектах критической инфраструктуры / Е. В. Азаренко, М. М. Дивизинюк, Г. В. Камишенцев, Т. В. Качур та ін. // Материалы Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы моделирования рисков и угроз возникновения чрезвычайных ситуаций на объектах критической инфраструктуры» (Киев, 2016). – Киев: УкрНДИ ЦЗ, 2016. – С. 12.

139. Аркин В. И. Задачи оптимального поиска. – М.: Наука, 1964. – 172 с.

140. Абчук В. А., Суздаль В. Г. Поиск объектов. – М.: Сов. радио, 1977. – 86 с.

141. Хеллман О. Введение в теорию оптимального поиска. – М.: Наука, 1985. – 248 с.

142. Демьянов В. Ф., Васильев Л. В. Недифференцируемая оптимизация. – М.: Наука, 1981. – 384 с.

143. Качур Т. В. Разработка математической модели радиационного обнаружения и идентификации людей и других опасных целей на подходах к охраняемым объектам критической инфраструктуры в интересах предотвращения чрезвычайных ситуаций террористического характера / С. В. Лазаренко, М. М. Дивизинюк, Т. В. Качур // Збірник наукових праць «Техногенна-екологічна безпека та цивільний захист». – Київ: ДУ «ІГНС НАН України», 2017. – Вип. 8 (2). – С. 52 – 59. – Інв. № 58.

144. Качур Т. В. Одно из перспективных направлений технического решения проблемы выделения полезного сигнала на фоне стационарных помех / С. В. Лазаренко, М. М. Дивизинюк, Т. В. Качур // Збірник наукових праць «Техногенна-екологічна безпека та цивільний захист». – Київ: ДУ «ІГНС НАН України», 2017. – Вип. 9 (3). – С. 49 – 56. – Інв. № 59.

145. Альсведе Р., Вегенер И. Задачи поиска. – М.: Мир, 1982. – 582 с.

146. Качур Т. В. Оценка эффективности управления чрезвычайной ситуацией террористического характера на объекте критической инфраструктуры / Е. В. Азаренко, Ю. Ю. Гончаренко, М. М. Дивизинюк, Т. В. Качур та ін. // Хімічна і радіаційна безпека: проблеми і рішення. – Збірник праць та повідомлень. – Київ, 2017. – С. 58.

147. Качур Т. В. Инженерно-технический метод защиты людей от поражающих факторов чрезвычайных ситуаций, вызванных загрязнением атмо-

сферы радиоактивными и отравляющими веществами на открытой местности / Е. В. Азаренко, Н. А. Бородина, Ю. Ю. Гончаренко, М. М. Дивизинюк, Е. Д. Желяк, Т. В. Качур, О. Н. Мирошник, А. С. Рыжкин, А. П. Фесай // Збірник наукових праць «Техногенна-екологічна безпека та цивільний захист». – 2017. – № 12. – С. 5 – 13.

148. Качур Т. В. Инженерно-технический метод защиты людей от поражающих факторов чрезвычайных ситуаций, вызванных загрязнением атмосферы радиоактивными и отравляющими веществами в населенных пунктах / Е. В. Азаренко, Н. А. Бородина, Ю. Ю. Гончаренко, М. М. Дивизинюк, Е. Д. Желяк, Т. В. Качур, О. Н. Мирошник, А. С. Рыжкин, А. П. Фесай // Збірник наукових праць «Техногенна-екологічна безпека та цивільний захист». – 2017. – № 13. – С. 14 – 22.

149. Качур Т. В. Характеристика періодів, етапів і фаз процесу управління надзвичайною ситуацією терористичного характеру на об'єкті критичної інфраструктури / О. В. Азаренко, Ю. Ю. Гончаренко, М. М. Дівізінюк, Т. В. Качур та ін. // Безпека інформації в інформаційно- телекомунікаційних системах. – Матеріали міжнародної науково-практичної конференції. – 2017. – Вип. 19. – С. 185.

150. Качур Т. В. Одно из перспективных направлений технического решения проблемы выделения полезного сигнала на фоне стационарных помех / С. В. Лазаренко, М. М. Дивизинюк, Т. В. Качур // Збірник наукових праць «Техногенна-екологічна безпека та цивільний захист». – Київ: ДУ «ІГНС НАН України», 2017. – Вип. 9 (3). – С. 49 – 56. – Інв. № 59.

151. Качур Т. В. Математическая модель радиационного обнаружения и идентификации людей и других опасных целей на подходах к охраняемым объектам критической инфраструктуры в сложных гидрометеорологических условиях в интересах предотвращения террористических актов / Е. В. Азаренко, Н. А. Бородина, М. М. Дивизинюк, Т. В. Качур // Збірник наукових праць «Техногенна-екологічна безпека та цивільний захист». – Київ: ДУ «ІГНС НАН України», 2017. – Вип. 10 (4). – С. 12 – 17. – Інв. № 60.

152. Качур Т. В. Методика прогнозирования чрезвычайных ситуаций, вызванных пожарами лесов Украины, подвергнутых радиоактивному загрязнению, с использованием разведывательных беспилотных летательных аппаратов / Е. В. Азаренко, М. М. Дивизинюк, Ю. Л. Забулонов, Т. В. Качур, А. В. Фаррахов // Збірник наукових праць «Техногенна-екологічна безпека та цивільний захист». – Київ: ДУ «ІГНС НАН України», 2018. – Вип. 11 (1). – С. 12 – 17. – Інв. № 61.

наукове видання

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ

Качур Тарас Валентинович
Дівізінюк Михайло Михайлович
Азаренко Олена Василівна
Собина Віталій Олександрович
Тарадуда Дмитро Віталійович

**ПРОГНОЗУВАННЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ,
ЯКІ ВИКЛИКАНІ ПОЖЕЖАМИ, В РАДІОАКТИВНО-ЗАБРУДНЕНИХ
ЛІСОВИХ МАСИВАХ УКРАЇНИ З ВИКОРИСТАННЯМ
РОЗВІДУВАЛЬНИХ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ**

монографія

Підписано до друку 17.12.2020. Формат 60x80 1/16.
Папір офсетний. Друк цифровий. Ум. друк. аркушів 6.
Обл.-вид. арк. 6,1. Тираж 50 прим. Видавничий номер 94/20
НУЦЗ України, 61023, м. Харків, вул. Чернишевська, 94.