

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ
ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ГАПАЛО АНДРІЙ ІГОРОВИЧ

УДК 614.841.42

ДИСЕРТАЦІЯ
ВПЛИВ НЕБЕЗПЕЧНИХ ЧИННИКІВ ЛУЧНИХ ПОЖЕЖ НА ДОВКІЛЛЯ

Спеціальність 261 – пожежна безпека

Галузь знань 26 – цивільна безпека

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ А. І. Гапало

Науковий керівник Попович Василь Васильович, доктор технічних наук, професор

Львів 2023

АНОТАЦІЯ

Ганало А. І. Вплив небезпечних чинників лучних пожеж на довкілля. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 261 «Пожежна безпека». – Львівський державний університет безпеки життєдіяльності Державної служби України з надзвичайних ситуацій, Львів, 2023.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуального науково-технічного завдання – дослідженню процесів розвитку лучних пожеж в природних екосистемах та вплив їх небезпечних чинників на довкілля і біоту, а також розробленню протипожежних перешкод у вигляді мінералізованих смуг.

Щороку у світі виникає близько 400 тис. лісових пожеж, які призводять до пошкодження близько 0,5% загальної площі усіх лісів та викиду в атмосферу мільйони тон продуктів горіння. На території України 41,5 млн га (68,7% загальної площі) сільськогосподарських угідь, на яких ведуть свою діяльність 40,7 тис. підприємств, з яких 81,5 % – дрібні підприємства із площею угідь до 500 га. Наразі немає системи фінансування запобігання, виявлення та гасіння пожеж на сільськогосподарських землях. Фактично пожежі на відкритих ландшафтах гасять підрозділи ДСНС України.

Найбільш вагомими чинниками впливу на виникнення та поширення пожеж у природних екосистемах (лучних пожеж) є кліматоп і мікрокліматоп, рельєф земної поверхні та фізико-хімічні властивості лісових горючих матеріалів чи порубкових решток, способи та методи гасіння. Аналіз моделей виникнення та поширення пожеж у природних екосистемах (лучних пожеж) показав, що системність їхнього використання у всіх країнах, яким вони притаманні, практично, відсутня. У різних державах зосереджені наукові школи щодо моделювання такого роду пожеж.

Дослідження впливу небезпечних чинників лучних пожеж зумовлено численними випадками підпалу сухої рослинності, стерні та порубкових решток.

Такі випадки призводять до поширення вогню в часі та просторі, який нерідко перекидається на житлові і господарські будівлі і споруди; задимленості довкілля, де проживає населення; зміну фізико-хімічних властивостей ґрунтів у бік зниження родючості; загибелі фори, фауни, мікробіоценозу тощо. Лучні пожежі спричиняють значні затрати матеріальних ресурсів на їх гасіння, перш за все Державної служби України з надзвичайних ситуацій. В умовах одночасного виникнення лучних пожеж на декількох територіях процеси їх локалізації та ліквідації викликають труднощі.

Досліджувані ділянки розташовані в межах Українського Розточчя на рівнинній території та у місцях, де проходили лучні пожежі, причиною яких був антропогенний чинник (вмисний підпал з метою знищення сухої рослинності). Розрахунково встановлено, що ймовірне виникнення найбільшої кількості пожеж у природних екосистемах в межах західних областей України (Західного Лісостепу) характерне для Львівської (178,72 пожеж на 1 млн. га).

Потужність еквівалентної дози фотонного іонізуючого випромінювання у місцях горіння лучної рослинності становила 0,11 мкЗв/год. та не перевищувала гранично-допустимі концентрації (0,3 мкЗв/год.).

На досліджуваній території у липні 2021 року спостерігалася підвищена пожежна небезпека природних екосистем. Розрахувавши комплексний показник пожежної небезпеки встановлено, що у липні 2021 року 48% днів належали до III класу пожежної небезпеки, 19% - до II класу, 7% - до IV класу і лише 26% - до I класу. Розроблений «Прилад для визначення пожежної небезпеки в лісових масивах та природних екосистемах за умовами погоди» з метою порівняння експериментальних показників із розрахунками. Завдяки використанню у пристрої автономного джерела живлення його можна застосовувати на ділянках з відсутнім електроживленням. Застосування в пристрої елементів, які можуть витримувати підвищені температуру та вологість дає змогу працювати не зазнаючи суттєвих його деформацій і зберігаючи не лише стабільність форми, але й експлуатаційні характеристики, що забезпечуватиме надійність та тривалу експлуатацію пристрою у використанні. Пристрій є компактним та може

використовуватись для експериментальних досліджень безпосередньо в польових умовах. Встановлено, що коефіцієнт кореляції між значеннями комплексного показника пожежної небезпеки із показниками вологості брусків «Приладу для визначення пожежної небезпеки в лісових масивах та природних екосистемах за умовами погоди» високий від'ємний та становить $-0,7914$. Тобто, при збільшенні комплексного показника – вологість знижується. Отже, розроблений прилад можна використовувати для прогнозування пожежної небезпеки в лісових масивах та природних екосистемах.

Встановлено, що довжина хвиль променевого теплообміну під час горіння лучної рослинності на відкритому просторі знаходиться в діапазоні $2,9 - 5,3$ мкм, що відповідає інфрачервоному (тепловому випромінюванню). температура полум'я під час горіння лучної рослинності в початковий момент часу становила $+66,7^{\circ}\text{C}$. У процесі горіння, через 20 с, температура полум'я сягнула $+352,5^{\circ}\text{C}$, максимальною температура полум'я була $+715,7^{\circ}\text{C}$ після вигорання всього горючого матеріалу (через 2,5 хв після початку дослідів).

Розрахована густина теплового потоку є значно вищою встановленого значення критичної густини теплового потоку для деревини ($q_{кр}$). Така ситуація потребує влаштування протипожежних бар'єрів та розробки низки пожежно-профілактичних заходів щодо недопущення лучних пожеж (запобігання спалювання сухої трави, стерні, навмисних підпалів тощо).

Встановлено, що мінімальна ширина протипожежного бар'єру (мінералізованої смуги) для обмеження поширення лучних пожеж становить $0,56$ м, максимальна – $1,28$ м. Встановлено, що відстань від фронту лучної пожежі до місця створення перешкоди повинна становити ≥ 286 м з метою безпеки особового складу пожежників. При збільшенні швидкості вітру від 1 м/с до 15 м/с дальність розлітання іскор та продуктів піролізу від осередку горіння лучної рослинності становитиме $907,4$ м.

Дослідивши поширення мінеральних речовин у генетичних горизонтах у залежності від давності виникнення можна констатувати, що лучні пожежі мають безпосередній вплив на їх концентрацію. Найнижчі показники кальцію, магнію,

фосфорних, калійних, азотних добрив притаманні досліджуваній ділянці 3, яка потерпала від температурного впливу за 1,5 роки до початку експериментальних досліджень. Найвищі показники концентрації кальцію, магнію, фосфорних, калійних, азотних добрив притаманні досліджуваній ділянці 4, де було штучне вогнище і зразки відбиралися в після пожежний період. У результаті проведення дослідження засоленості постпірогенних ґрунтів Українського Розточчя встановлено, що відновлення едафічних показників ґрунту відбувається залежно від давності протікання низових лісових пожеж. Для досліджень кислотності та засоленості ґрунтів прийняли діапазон виникнення низових лісових пожеж 4 роки. Встановлено, що на досліджуваних ділянках, які піддавалися впливу вогню давніше, показники кислотності та засоленості відповідають фоновим значенням та є значно нижчими від тих же значень для модельного вогнища.

Встановлено, що найвища питома активність радіонуклідів К 40, Ra 226, Th 232 притаманна досліджуваній ділянці, де процеси горіння спостерігалися за 1,5 роки до початку проведення експерименту і досліджуваній ділянці з модельним вогнищем. Зокрема, питома активність К 40 у генетичних горизонтах становила на досліджуваній ділянці 3 – 168-181 Бк/кг, Ra 226 – 9,85-27,3 Бк/кг, Th 232 – 0,8-22,6 Бк/кг. На досліджуваній ділянці 4 питома активність К 40 – 164-192 Бк/кг, Ra 226 – 7,68-11,1 Бк/кг, Th 232 – 1,3-12,8 Бк/кг. Найбільша питома активність радіонуклідів на пірогенно трансформованих ґрунтах знаходиться в діапазоні 0-50 Бк/кг.

В умовах Українського Розточчя формування пожежостійких узлісь слід передбачити за участю дуба звичайного і граба звичайного, які займаються та самозаймаються при вищих температурах, аніж інші види дерев. Встановлено, що найнижчий ступінь обуглювання має дуб звичайний, який протягом 10 хв прогорів на 38 мм (при товщині колоди 124 мм). Такі породи як граб звичайний та клен гостролистий повністю перегоріли за 10 хв (при діаметрах 129 мм та 140 мм відповідно).

Здійснено моделювання швидкості поширення фронту лучної пожежі в досліджуваному регіоні з врахуванням різної вологості горючого матеріалу

(лучної рослинності), швидкості вітру та коефіцієнтів k і C та часу гасіння (хв) крайки лучної пожежі довжиною від 1 до 3000 м за допомогою 6-ти пожежників (1 відділення) та 13-ти пожежників (2 відділення).

Моделювання процесів виникнення та поширення лучних пожеж на досліджуваній ділянці виконано за допомогою WFDS. В цілому, моделювання пожежі тривало 180 с. Стрімке полум'яне горіння припинилося на 66 с від початку підпалу, а після цього спостерігалось поодинокі горіння та тління досліджуваної ділянки. Встановлено, що максимальне значення температури полум'я становило понад $+1250^{\circ}\text{C}$, що зауважено на 33 с в межах горіння трави у вигляді стогів. Проте, з 66-ї с спостерігалось зниження температури полум'я в середовищі горіння дослідної ділянки до температури довкілля.

У результаті створення логістичних ланцюгів залучення протипожежної техніки для гасіння пожеж у природних екосистемах (лісових і лучних пожеж) запропоновано три варіанти: гасіння торфовищ, гасіння верхових пожеж, гасіння низових пожеж. Комплексне використання пристосованих транспортних засобів із автомобілями пожежними лісовими, функціональні можливості яких не дозволяють виконати ряд додаткових робіт, забезпечує більшу ефективність гасіння лісових та лучних пожеж, торфовищ.

Ключові слова: пожежна безпека, відбір проб, лісова пожежа, розпилені струмені, вогнезахисні засоби, гасіння лісових пожеж, вогнегасні речовини, ризики, трав'яні пожежі, піноутворювач, пожений ствол, математичне моделювання, теплообмін.

Список публікацій здобувача

Публікації, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. Попович В. В., Гапало А. І. Температурний вплив ландшафтних пожеж на екологічний стан едафотопу. *Zeszyty Naukowe SGSP*, 2020, Nr. 76/4/2020. 29-45.

<https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.5977> (індексується в *Index Copernicus International*).

2. Попович В. В., Гапало А. І. Засоленість постпірогенних ґрунтів Українського Розточчя. Вісник ЛДУБЖД, №22, 2020. 12-17. <https://doi.org/10.32447/20784643.22.2020.02>

3. Попович В. В., Гапало А. І., Башинський О. І. Обвуглювання стовбурів листяних дерев під час лісових пожеж в межах Українського Розточчя. Пожежна безпека, №37, 2020. 58-63. <https://doi.org/10.32447/20786662.37.2020.09>

4. Popovych, V., Gapalo, A. Monitoring of Ground Forest Fire Impact on Heavy Metals Content in Edafic Horizons. Journal of Ecological Engineering, 22(5), 2021. 96-103. <https://doi.org/10.12911/22998993/135872> (індексується в *Scopus*).

5. Popovych, V., Henyk, Y., Gapalo, A., Bosak, P., Popovych, N. Specific Activity of Radionuclides in Soils Disturbed by Forest Fires. Journal of Ecological Engineering, 23(6), 2022. 265–270. <https://doi.org/10.12911/22998993/148191> (індексується в *Scopus*).

6. Popovych, V., Gapalo, A., Tovarianskyi, V. Investigation of Fires in Natural Ecosystems of the Ukrainian Roztochchiya by Wildland Fire Dynamics Simulator Model. Ecological Engineering and Environmental Technology, 24(3), 2023. 36-42. <https://doi.org/10.12912/27197050/159576> (індексується в *Scopus*).

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

1. Гапало А. І. Еколого-пірологічна небезпека спалювання лучної рослинності. *Проблеми екологічної безпеки: Матер. XV Міжнар. наук.-техн. конф. (м. Кременчук, 11-13 жовтня 2017 р.).* 2017. С. 22.

2. Гапало А. І. Особливості виникнення та поширення низових лісових пожеж на території Львівської області. *Екологічна безпека як основа сталого розвитку*

суспільства. *Європейський досвід і перспективи: Матер. III Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Львів, 14 вересня 2018 р.).* 2018. С. 25.

3. Гапало А. І. Особливості виникнення ландшафтних пожеж у Львівській області. *Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності: Зб. наук. праць XIII Міжнар. наук.-практ. конф. молодих вчених, курсантів та студентів (м. Львів, 22-23 березня 2018 р.).* 2018. С. 153-154.

4. Попович В. В., Гапало А. І. Вплив лісових пожеж на фізико-хімічні показники ґрунту. *Сучасний стан і перспективи розвитку ландшафтної архітектури, садово-паркового господарства, урбоекології та фітомеліорації: Матер. Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Львів, 4-5 квітня 2019 р.).* 2019. С. 289-290.

5. Gapalo A., Popovych V. Environmental hazard of burning dry grass and grassland vegetation. *Ecological impact of fire. Deforestation and forest degradation. Reclamation of devastated landscapes: The second round table (Lviv, March 29, 2019).* 2019. P. 7-9.

6. Popovych, V., Gapalo, A., Shukel, I., Renkas, A. Logistic chains of application of firefighting equipment for suppression of forest and natural ecosystems fires. *SGEM 2020: 20th International Scientific GeoConference (Albena, 18 – 24 August, 2020).* 2020. 20(5.1). P. 499-506. <https://doi.org/10.5593/sgem2020/5.1/s20.063> (індексується в Scopus).

7. Гапало А. І., Попович В. В. Особливості розвитку та ліквідації лісових пожеж. *Актуальні питання техногенної та цивільної безпеки України: Матер. II Всеукр. наук. конф. (м. Миколаїв, 18-19 вересня 2020 р.).* 2020. С. 135-136.

8. Попович В. В., Гапало А. І. Важкі метали в поверхневому шарі едафотопу на постпірогенних територіях. *Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи: Матер. IV Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Львів, 26 березня 2021 р.).* 2021. С. 133-134.

SUMMARY

Gapalo A. I. Impact of dangerous factors of meadow fires on the environment. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for the Doctor of Philosophy degree in specialty 261 "Fire Safety". - Lviv State University of Life Safety of the State Emergency Service of Ukraine, Lviv, 2023.

The dissertation work is devoted to the solution of an actual scientific and technical task - the study of the development processes of meadow fires in natural ecosystems and the impact of their dangerous factors on the environment and biota, as well as the development of fire prevention obstacles in the form of mineralized strips.

Every year, there are about 400,000 forest fires in the world, which damage about 0.5% of the total area of all forests and release millions of tons of combustion products into the atmosphere. On the territory of Ukraine, there are 41.5 million hectares (68.7% of the total area) of agricultural land, on which 40.7 thousand enterprises operate, of which 81.5% are small enterprises with an area of land up to 500 hectares. Currently, there is no funding system for preventing, detecting and extinguishing fires on agricultural land. In fact, fires on open landscapes are extinguished by units of the State Emergency Service of Ukraine.

The most important factors influencing the occurrence and spread of fires in natural ecosystems (meadow fires) are the climate and microclimate, the relief of the earth's surface and the physical and chemical properties of forest combustible materials or felling residues, methods and methods of extinguishing. The analysis of the patterns of the occurrence and spread of fires in natural ecosystems (meadow fires) showed that there is practically no systematic use of them in all countries where they occur. In different states, scientific schools are concentrated on modeling this kind of fires.

The study of the influence of dangerous factors of meadow fires is determined by numerous cases of setting fire to dry vegetation, stubble, and felling residues. Such

cases lead to the spread of fire in time and space, which often spreads to residential and commercial buildings and structures; smoky environment where the population lives; change in the physical and chemical properties of soils in the direction of decreasing fertility; death of flora, fauna, microbocenosis, etc. Meadow fires cause significant costs of material resources for their extinguishment, primarily of the State Emergency Service of Ukraine. In the conditions of the simultaneous occurrence of meadow fires in several territories, the processes of their localization and elimination cause difficulties.

The studied areas are located within the Ukrainian Roztochya on a flat area and in places where meadow fires took place, the cause of which was an anthropogenic factor (intentional arson to destroy dry vegetation). It was calculated that the probable occurrence of the largest number of fires in natural ecosystems within the western regions of Ukraine (Western Forest Steppe) is characteristic of Lviv (178.72 fires per 1 million ha).

The power of the equivalent dose of photon ionizing radiation in places where meadow vegetation is burning was $0.11 \mu\text{Sv/h}$. and did not exceed the maximum permissible concentration ($0.3 \mu\text{Sv/hour}$).

In July 2021, an increased fire hazard of natural ecosystems was observed in the studied territory. After calculating the comprehensive index of fire danger, it was established that in July 2021, 48% of days belonged to the III class of fire danger, 19% - to the II class, 7% - to the IV class, and only 26% - to the I class. The "Device for determining fire danger in forest areas and natural ecosystems according to weather conditions" was developed in order to compare experimental indicators with calculations. Due to the use of an autonomous power source in the device, it can be used in areas with no power supply. The use of elements in the device that can withstand increased temperature and humidity allows you to work without experiencing significant deformations and maintain not only the stability of the form, but also the operational characteristics, which will ensure the reliability and long-term operation of the device in use. The device is compact and can be used for experimental research directly in the field. It was established that the correlation coefficient between the values of Nesterov's complex fire hazard indicator and the moisture indicators of the bars of

the "Device for determining the fire hazard in forest areas and natural ecosystems according to weather conditions" is high negative and is -0.7914. That is, when the complex index increases, the humidity decreases. Therefore, the developed device can be used to predict fire danger in forest areas and natural ecosystems.

It was established that the wavelength of radiant heat exchange during the burning of meadow vegetation in the open space is in the range of 2.9 - 5.3 μm , which corresponds to infrared (thermal radiation). The temperature of the flame during the burning of meadow vegetation at the initial moment of time was +66.7°C. In the process of burning, after 20 s, the flame temperature reached +352.5°C, the maximum flame temperature was +715.7°C after all the combustible material burned out (2.5 min after the start of the experiment).

The calculated heat flow density is significantly higher than the established value of the critical heat flow density for wood (q_{kr}). Such a situation requires the installation of fire barriers and the development of a number of fire prevention measures to prevent meadow fires (prevention of burning dry grass, stubble, deliberate arson, etc.).

It was established that the minimum width of the fire barrier (mineralized strip) to limit the spread of meadow fires is 0.56 m, the maximum is 1.28 m. It was established that the distance from the front of the meadow fire to the place of creation of the obstacle should be ≥ 286 m in order to safety of firefighters. When the wind speed increases from 1 m/s to 15 m/s, the range of flying sparks and pyrolysis products from the combustion center of meadow vegetation will be 907.4 m.

Having studied the distribution of mineral substances in genetic horizons depending on the age of occurrence, it can be stated that meadow fires have a direct effect on their concentration. The lowest rates of calcium, magnesium, phosphorus, potassium, and nitrogen fertilizers are characteristic of the studied site 3, which suffered from temperature effects 1.5 years before the beginning of experimental research. The highest concentrations of calcium, magnesium, phosphorus, potassium, and nitrogen fertilizers are characteristic of the studied site 4, where there was an artificial hearth and samples were taken in the post-fire period. As a result of conducting a study of the salinity of post-pyrogenic soils of the Ukrainian Roztochya region, it was established

that the recovery of edaphic soil indicators occurs depending on the age of lowland forest fires. For studies of soil acidity and salinity, the range of occurrence of lowland forest fires was assumed to be 4 years. It was established that the acidity and salinity indicators correspond to the background values and are significantly lower than the same values for the model hearth in the studied areas, which were exposed to fire earlier.

It was established that the highest specific activity of radionuclides K 40, Ra 226, Th 232 is characteristic of the studied area, where combustion processes were observed 1.5 years before the start of the experiment and the studied area with a model hearth. In particular, the specific activity of K 40 in genetic horizons was 3 – 168-181 Bq/kg, Ra 226 – 9.85-27.3 Bq/kg, Th 232 – 0.8-22.6 Bq/kg in the studied area. In the studied area 4, the specific activity of K 40 is 164-192 Bq/kg, Ra 226 is 7.68-11.1 Bq/kg, Th 232 is 1.3-12.8 Bq/kg. The highest specific activity of radionuclides on pyrogenically transformed soils is in the range of 0-50 Bq/kg.

In the conditions of the Ukrainian Roztochya, the formation of fire-resistant forest edges should be provided with the participation of common oak and hornbeam, which ignite and self-ignite at higher temperatures than other types of trees. It was established that the lowest degree of charring is common oak, which burned by 38 mm within 10 minutes (with a log thickness of 124 mm). Such species as hornbeam and maple completely burned out in 10 minutes (with diameters of 129 mm and 140 mm, respectively).

The speed of the spread of the meadow fire front in the studied region was modeled, taking into account the different moisture content of the combustible material (meadow vegetation), wind speed and k and C coefficients, and the extinguishing time (min) of the edge of a meadow fire with a length of 1 to 3000 m with the help of 6 firefighters (1 department) and 13 firefighters (2 departments).

Modeling of the processes of the occurrence and spread of meadow fires in the studied area was performed with the help of WFDS. In general, the fire simulation lasted 180 seconds. Rapid flaming burning stopped 66 s from the start of ignition, and after that, isolated burning and smoldering of the studied area was observed. It was

established that the maximum value of the flame temperature was more than $+1250^{\circ}\text{C}$, which was observed for 33 s within the limits of burning grass in the form of stacks. However, from the 66th s, a decrease in the flame temperature in the combustion environment of the experimental area to the ambient temperature was observed.

As a result of the creation of logistical chains involving fire-fighting equipment for extinguishing fires in natural ecosystems (forest and meadow fires), three options are proposed: extinguishing peatlands, extinguishing mountain fires, extinguishing grass fires. Complex use of adapted vehicles with forest firefighting vehicles, the functional capabilities of which do not allow to perform a number of additional works, ensures greater efficiency of extinguishing forest and meadow fires, peatlands.

Key words: fire safety, meadow fire, dangerous factors of fires, environment, heat exchange, emissivity, combustible material, fire forecasting, mineralized strip, charring, fire extinguishing.

List of publications of the acquirer

Publications in which the main scientific results of the dissertation are published

1. Popovych V.V., Gapalo A.I. Temperature influence of landscape fires on the ecological state of the edaphotope. *Zeszyty Naukowe SGSP*, 2020, Nr. 76/4/2020. 29-45. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.5977> (indexed in *Index Copernicus International*).
2. Popovych V.V., Gapalo A.I. Salinity of post-pyrogenic soils of Ukrainian Roztochya. *Bulletin of LDUBZHD*, No. 22, 2020. 12-17. <https://doi.org/10.32447/20784643.22.2020.02>
3. Popovych V.V., Gapalo A.I., Bashynskyi O.I. Charring of the trunks of deciduous trees during forest fires within the boundaries of the Ukrainian Roztochya. *Fire safety*, No. 37, 2020. 58-63. <https://doi.org/10.32447/20786662.37.2020.09>

4. Popovych, V., Gapalo, A. Monitoring of Ground Forest Fire Impact on Heavy Metals Content in Edafic Horizons. *Journal of Ecological Engineering*, 22(5), 2021. 96-103. <https://doi.org/10.12911/22998993/135872> (indexed in *Scopus*).
5. Popovych, V., Henyk, Y., Gapalo, A., Bosak, P., Popovych, N. Specific Activity of Radionuclides in Soils Disturbed by Forest Fires. *Journal of Ecological Engineering*, 23(6), 2022. 265–270. <https://doi.org/10.12911/22998993/148191> (indexed in *Scopus*).
6. Popovych, V., Gapalo, A., Tovarianskyi, V. Investigation of Fires in Natural Ecosystems of the Ukrainian Roztochchiya by Wildland Fire Dynamics Simulator Model. *Ecological Engineering and Environmental Technology*, 24(3), 2023. 36-42. <https://doi.org/10.12912/27197050/159576> (indexed in *Scopus*).

Publications certifying the approval of the dissertation materials

1. Gapalo A. I. Ecological and pyrological danger of burning meadow vegetation. *Problems of environmental safety: Mater. XV International science and technology conf. (Kremenchuk, October 11-13, 2017)*. 2017. P. 22.
2. Gapalo A. I. Peculiarities of occurrence and spread of low-level forest fires in the territory of Lviv region. Environmental safety as the basis of sustainable development of society. *European experience and perspectives: Mater. III International science and practice conf. (Lviv, September 14, 2018)*. 2018. P. 25.
3. Gapalo A. I. Peculiarities of occurrence of landscape fires in the Lviv region. *Problems and prospects of the development of the life safety system: Collection. of science Proceedings of the XIII International science and practice conf. of young scientists, cadets and students (Lviv, March 22-23, 2018)*. 2018. P. 153-154.
4. Popovych V.V., Gapalo A.I. The influence of forest fires on the physical and chemical parameters of the soil. *The current state and prospects for the development of*

landscape architecture, horticulture, urban ecology and phytoremediation: Mater. International science and practice conf. (Lviv, April 4-5, 2019). 2019. P. 289-290.

5. Gapalo A., Popovych V. Environmental hazard of burning dry grass and grassland vegetation. *Ecological impact of fire. Deforestation and forest degradation. Reclamation of devastated landscapes: The second round table (Lviv, March 29, 2019).* 2019. P. 7-9.

6. Popovych, V., Gapalo, A., Shukel, I., Renkas, A. Logistic chains of application of firefighting equipment for suppression of forest and natural ecosystems fires. *SGEM 2020: 20th International Scientific GeoConference (Albena, August 18 – 24, 2020).* 2020. 20(5.1). P. 499-506. <https://doi.org/10.5593/sgem2020/5.1/s20.063>

7. Gapalo A. I., Popovych V. V. Peculiarities of the development and liquidation of forest fires. *Actual issues of man-made and civil security of Ukraine: Mater. II All-Ukrainian of science conf. (Mykolaiv, September 18-19, 2020).* 2020. C. 135-136.

8. Popovych V.V., Gapalo A.I. Heavy metals in the surface layer of the edaphotope in post-pyrogenic territories. *Environmental safety as the basis of sustainable development of society. European experience and perspectives: Mater. IV International science and practice conf. (Lviv, March 26, 2021).* 2021. P. 133-134.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ.....	18
ВСТУП.....	19
РОЗДІЛ 1. ПОЖЕЖІ У ПРИРОДНИХ ЕКОСИСТЕМАХ ТА ЇХ ВПЛИВ НА ДОВКІЛЛЯ І ЗДОРОВ'Я ЛЮДЕЙ.....	26
1.1. Вплив пожеж у природних екосистемах на довкілля...	26
1.2. Чинники впливу на виникнення та поширення лучних пожеж.....	43
1.3. Аналіз моделей виникнення та поширення лучних пожеж.....	52
1.4. Технічні пристрої прогнозування та ліквідації лісових пожеж.....	57
1.5. Висновки до Розділу 1.....	59
РОЗДІЛ 2. ПРОГРАМА, ОБ'ЄКТИ, МЕТОДИ, ДОСЛІДЖУВАНІ ДІЛЯНКИ ТА ПРИРОДНО-КЛІМАТИЧНІ УМОВИ ПОШИРЕННЯ ЛУЧНИХ ПОЖЕЖ У РЕГІОНІ.....	61
2.1. Програма, об'єкти та методи досліджень.....	61
2.1.1. Метод експериментального визначення температури займання твердих речовин і матеріалів.....	66
2.1.2. Метод експериментального визначення температури самозаймання твердих речовин і матеріалів.....	66
2.1.3. Характеристика пожежної безпеки досліджуваних ділянок.....	67
2.2. Кліматичні і температурні умови Українського Розточчя.....	68
2.3. Видовий склад лучної рослинності Українського Розточчя.....	71
2.4. Пірогенна сукцесія досліджуваної лучної рослинності Українського Розточчя.....	73
2.5. Вплив щільності населення на виникнення пожеж у природних екосистемах.....	77
2.6. Висновки до Розділу 2.....	79
РОЗДІЛ 3. НЕБЕЗПЕЧНІ ЧИННИКИ ЛУЧНИХ ПОЖЕЖ ТА ЇХ ВПЛИВ НА БІОТУ.....	81
3.1. Променевий теплообмін під час лучних пожеж.....	81

3.2. Випромінювальна здатність горючого матеріалу та густина теплового потоку під час лучних пожеж.....	85
3.3. Моделювання температурних та вологісних режимів експериментальної лучної пожежі.....	88
3.4. Моделювання поширення лучних пожеж за допомогою WFDS...	94
3.5. Температурний вплив на екологічний стан ґрунту під час лучних пожеж.....	100
3.5.1. Температурний вплив на міграцію важких металів.....	100
3.5.2. Температурний вплив на міграцію мінеральних речовин.....	107
3.5.3. Температурний вплив на міграцію радіонуклідів.....	112
3.6. Засоленість постпірогенних ґрунтів.....	118
3.7. Зміна кислотності ґрунтів внаслідок лучних пожеж.....	125
3.8. Висновки до Розділу 3.....	127
РОЗДІЛ 4. ПРОТИПОЖЕЖНА ПРОФІЛАКТИКА ТА ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ТА ЛІКВІДАЦІЇ ЛУЧНИХ ПОЖЕЖ	129
4.1. Особливості прогнозування пожеж у природних екосистемах.....	129
4.2. Розрахунок протипожежних бар'єрів у вигляді мінералізованих смуг.....	195
4.3. Експериментальні дослідження протипожежних бар'єрів у вигляді мінералізованих смуг.....	141
4.4. Обвуглювання стовбурів листяних дерев під час лучних пожеж.....	146
4.5. Теоретичні аспекти формування пожежостійких узлісь.....	151
4.6. Розрахунок сил і засобів для гасіння лучних пожеж.....	157
4.7. Логістичні ланцюги експлуатації протипожежної техніки під час гасіння пожеж у природних екосистемах.....	162
4.8. Висновки до Розділу 4.....	169
ВИСНОВКИ.....	171
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	175
ДОДАТКИ.....	195

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

БСК	– біохімічне споживання кисню
ВМ	– важкі метали
ГДК	– граничнодопустима концентрація
ГН	– граничні норми
ДК	– державний класифікатор
ДСНС України	– Державна служба України з надзвичайних ситуацій
ЄС	– Європейський Союз
КГП	– керівник гасіння пожежі
КЛНС	– керівник ліквідації надзвичайної ситуації
НС	– надзвичайна ситуація
ПАР	– поверхнево активні речовини
ПБ	– пожежна безпека
ПЕД	– потужність еквівалентної дози
С і З	– сили і засоби
ТЗ	– транспортні засоби
ХПК	– хімічна потреба в кисні
ХСК	– хімічне споживання кисню
WFDS	– Wildland-Urban Fire Dynamic Simulator (симулятор динаміки пожеж в дикій природі і містах)

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Лучні пожежі, які виникають внаслідок умисного підпалу сухої рослинності, стерні чи порубкових решток є чинником додаткового техногенного навантаження на довкілля та здоров'я людей. Як різновид пожеж у природних екологічних системах, лучні пожежі спричиняють вигорання значної кількості лісових культур, зміну фізико-хімічних властивостей ґрунтових генетичних і водоносних горизонтів, міграцію радіонуклідів і важких металів у довкілля, виділення продуктів горіння у вигляді диму і утворення смогу в населених пунктах. Надзвичайно небезпечними є лучні пожежі у Чорнобильській зоні відчуження, внаслідок яких утворюється, так званий, радіоактивний дим (Азаров та ін., 2018), який піднімається на декілька кілометрів у радіусі до 30 км, що створює радіаційну небезпеку для населення. Загалом в Україні частка лучних пожеж від решти в екосистемах становить 10%, одними з основних причин яких є антропогенний чинник: навмисний підпал – 47%, необережне поводження з вогнем – 26%, спалювання сухої рослинності – 3%.

В Україні та за кордоном (США, Канада, Мексика, Бразилія, Чилі, Австралія, Китай, Іспанія, Греція, Туреччина і ін.) проводяться численні дослідження чинників виникнення, поширення, локалізації та ліквідації пожеж у природних екосистемах, у тому числі лучних. Серед них слід відмітити наукові роботи таких вчених як: Soto et al. (1998), Fontúrbel et al. (2012), Smits et al. (2016), Moon et al. (2016), Alcasena et al. (2018), Fitch et al. (2018), Cardil et al. (2019), Agranat et al. (2020), Vilà-Vilardella et al. (2020), Wittenberg et al. (2020), Кузик (2014, 2017, 2019, 2020), Ворон (2011, 2012, 2014, 2016), Гуменюк (2015), Зібцев (2019, 2020), Тарасенко (2015), Азаров, Єременко, Сидоренко (2018, 2020); Буц (2012, 2013, 2020), Ковалишин (2015, 2020), Товарянський (2016, 2018), Драч (2020), Сукач (2021) та ін. Проте, дослідження чинників впливу на виникнення і ліквідацію лучних пожеж в залежності від видового складу лучної рослинності, природно-кліматичних і погодних умов та географічного розташування, а також

вплив такого роду пожеж на зміну фізико-хімічних властивостей ґрунтових генетичних горизонтів, міграцію радіонуклідів і важких металів у довкілля здійснено не у повній мірі. Наукові дослідження лучних пожеж та їх наслідків в межах Українського Розточчя потребують детальних досліджень з метою оцінки техногенного впливу на довкілля та розробки заходів щодо їх попередження, локалізації та ліквідації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконана в контексті одного із основних завдань Державної служби з надзвичайних ситуацій України, які визначені Постановою Кабінету Міністрів України від 16 грудня 2015 р. № 1052 "Про затвердження Положення про Державну службу України з надзвичайних ситуацій", а саме – реалізація державної політики у сфері цивільного захисту, захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій, запобігання їх виникненню, ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, рятувальної справи, гасіння пожеж, пожежної та техногенної безпеки, діяльності аварійно-рятувальних служб, а також гідрометеорологічної діяльності та в межах науково-дослідної роботи Львівського державного університету безпеки життєдіяльності «Техногенно-екологічна безпека породних відвалів вугільних шахт, полігонів твердих побутових відходів та пірогенно трансформованих територій» №0121U113363, де здобувач був виконавцем.

Мета і завдання дослідження. Мета – встановити основні складові небезпечних чинників лучних пожеж та їх вплив на компоненти довкілля і організм людини, а також розробити заходи щодо їх локалізації та ліквідації.

Досягнення поставленої мети зумовило необхідність виконання таких завдань:

- встановити видовий склад трав'яної та дерево-чагарникової рослинності в межах досліджуваного регіону, а також видовий склад пірогенної сукцесії;
- дослідити вплив високих температур на фізико-хімічні показники едафотопів та відновлення ґрунтів за давністю виникнення лучної пожежі;

- дослідити вплив лучних пожеж на деревні породи, які притаманні досліджуваному регіону;
- встановити температури займання та самозаймання деревних порід у залежності від умов місцезростань;
- встановити основні температурні та вологісні режими модельного вогнища;
- встановити основні параметри променевого теплообміну модельного вогнища;
- здійснити моделювання лучної пожежі у середовищі WFDS;
- дослідити параметри протипожежних бар'єрів та зробити рекомендації щодо дальності їх встановлення від осередків горіння лучної рослинності;
- здійснити розрахунки сил і засобів для гасіння лучних пожеж.

Об'єкт дослідження – процеси, чинники розвитку, вплив на довкілля, локалізація та ліквідація лучних пожеж.

Предмет дослідження – вплив процесів спалювання сухої рослинності, стерні, порубкових решток на стан пожежної безпеки лучних екосистем та особливості влаштування протипожежних бар'єрів.

Методи дослідження. У процесі досліджень використовувалися такі методи: аналізу результатів наукових досліджень, які стосуються лучних пожеж та пожеж в природних екосистемах і пожежонебезпечних властивостей речовин і матеріалів; лабораторні методи визначення пожежонебезпечних властивостей горючих матеріалів, зокрема стандартні методи визначення температур займання, самозаймання; експериментальні методи дослідження лучних пожеж; методи визначення метеорологічних показників в польових умовах; методи статистичного, кластерного, регресійного аналізу та математичної обробки результатів досліджень; методи комп'ютерного моделювання процесів займання та поширення лучної пожежі; статистичні методи обробки отриманих результатів досліджень.

Наукова новизна отриманих результатів. У результаті дослідження небезпечних чинників лучних пожеж та розроблення заходів із підвищення ефективності щодо їх локалізації та ліквідації отримано такі наукові результати:

вперше:

- встановлено видовий склад пірогенної сукцесії лучних екосистем та досліджено вплив високих температур на міграцію радіонуклідів, важких металів, мінеральних речовин едафотопів і відновлення ґрунтів за давністю виникнення лучної пожежі;
- експериментально встановлено вплив лучних пожеж на обвуглювання стовбурів деревних порід, які розвиваються в лучних екосистемах та досліджено температури займання та самозаймання деревних порід у залежності від умов місцезростань в досліджуваному регіоні;
- за результатами експериментальних, польових досліджень та математичних розрахунків встановлено ширину протипожежного бар'єру, відстань від фронту лучної пожежі до місця створення перешкоди, дальність розлітання іскор та продуктів піролізу від осередку горіння лучної рослинності, кількість особового складу для гасіння іскор, час рятування людини (групи людей) під час лучних пожеж;

удосконалено:

- конструкцію «Приладу для визначення пожежної небезпеки в лісових масивах та природних екосистемах за умовами погоди» і встановлено співвідносність із розрахунками комплексного показника пожежної небезпеки;
- методику розрахунку сил і засобів шляхом моделювання швидкості поширення фронту лучної пожежі та моделювання часу гасіння крайки лучної пожежі за заданими параметрами;

набули подальшого розвитку:

- спосіб влаштування протипожежного бар'єру у вигляді мінералізованої смуги в залежності від висоти полум'я лучної рослинності;
- критерії вибору та алгоритм експлуатації протипожежної техніки під час гасіння пожеж у природних екосистемах шляхом врахування техніко-експлуатаційних показників.

Практичне значення отриманих результатів. Встановлено геометричні параметри протипожежних бар'єрів для локалізації лучних пожеж та відстань від фронту лучної пожежі до місця їх створення. Розрахунково встановлено дальність розлітання іскор та продуктів піролізу від осередку горіння лучної рослинності, кількість особового складу пожежно-рятувального підрозділу для гасіння іскор, які розлітаються від лучної пожежі, а також час рятування людей у залежності від початкових умов. Теоретично обумовлено параметри формування пожежостійких узлісь та логістичні ланцюги експлуатації протипожежної техніки під час гасіння пожеж у природних екосистемах.

Результати досліджень використовують: Загін технічної служби ГУ ДСНС України у Львівській області – для оптимізації залучення особового складу пожежно-рятувальних підрозділів для гасіння лучних пожеж; Львівський державний університет безпеки життєдіяльності в навчальному процесі.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є завершеною науковою працею та є самостійним дослідженням здобувача, що має наукове та практичне значення. Дисертаційна робота є результатом наукових досліджень дисертанта. Автором розроблено програму та завдання досліджень. Усі наукові ідеї, положення і результати теоретичних досліджень дисертації розроблені, сформульовані та отримані автором у період з 2017 до 2022 років.

У наукових публікаціях, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації в співавторстві, конкретний особистий внесок здобувача полягає в наступному: [1] – сформульовано актуальність проблеми та завдання дослідження, закладено експериментальну досліджувану ділянку, здійснено вимірювання температури поверхні ґрунту після підпалу, проведено аналіз отриманих показників температури поверхні ґрунту; [2] – складено програму дослідження, відібрано проби ґрунтів з досліджуваної ділянки (згарища) та передано для аналізу засоленості в лабораторію медичної токсикології, сформульовано висновки; [3] – сформульовано проблему щодо пожежної небезпеки деревно-чагарникової рослинності, проведено вимірювання ступеня обуглення зразків деревини, сформульовано висновки; [4] – сформульовано

мету дослідження, відібрано проби ґрунтів з досліджуваної ділянки (згарища) та передано в лабораторію медичної токсикології для аналізу в них важких металів, сформульовано висновки; [5] – сформульовано актуальність проведення досліджень, відібрано проби ґрунтів з досліджуваної ділянки (згарища) та передано в лабораторію медичної токсикології для аналізу в них радіонуклідів, сформульовано висновки; [6] – сформульовано мету дослідження, здійснено аналіз літературних джерел щодо моделювання у WFDS, сформульовано висновки.

У наукових публікаціях, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації в співавторстві, конкретний особистий внесок здобувача полягає в наступному: [4] – здійснено аналіз літературних джерел щодо впливу лісових пожеж на фізико-хімічні показники ґрунту, проаналізовано фізико-хімічні показники ґрунту, який піддався температурному впливу; [5] – здійснено аналіз літературних джерел щодо впливу лісових пожеж на довкілля та рослинність, сформульовано висновки; [6] – сформульовано проблему щодо залучення пожежно-рятувальної техніки для гасіння пожеж в природних екосистемах, сформульовано висновки; [7] – сформульовано актуальність проблеми виникнення лісових пожеж, опрацьовано літературні джерела, сформульовано висновки; [8] – проаналізовано вміст важких металів у поверхневому шарі едафотопу після лучної пожежі, сформульовано висновки.

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи та окремі результати досліджень доповідались на круглих столах та конференціях різних рівнів: XV Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми екологічної безпеки» (м. Кременчук, 2017 р.); III Міжнародній науково-практичній конференції «Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи» (м. Львів, 2018); XIII Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених, курсантів та студентів «Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності» (м. Львів, 2018 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасний стан і перспективи розвитку ландшафтної архітектури,

садово-паркового господарства, урбоекотлогії та фітомеліорації» (м. Львів, 2019 р.); Круглому столі «Ecological impact of fire. Deforestation and forest degradation. Reclamation of devastated landscapes» (Lviv, 2019); 20th International Scientific GeoConference «SGEM 2020» (Albena, 2020 р.); II Всеукраїнській науковій конференції «Актуальні питання техногенної та цивільної безпеки України» (м. Миколаїв, 2020 р.); IV Міжнародній науково-практичній конференції «Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи» (м. Львів, 2021).

Публікації. За результатами досліджень, представлених у дисертаційній роботі, опубліковано 14 наукових праць, з яких: 6 – наукові праці в яких опубліковані основні наукові результати дисертації (3 з них опубліковані в наукометричних журналах бази даних Scopus); 8 – наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації (1 з них проіндексована базою даних Scopus).

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Список використаних джерел включає 188 найменувань. Загальний обсяг роботи складає 214 сторінок з 18 таблицями та 73 рисунками.

РОЗДІЛ 1. ПОЖЕЖІ У ПРИРОДНИХ ЕКОСИСТЕМАХ ТА ЇХ ВПЛИВ НА ДОВКІЛЛЯ

1.1. Вплив пожеж у природних екосистемах на довкілля

Пожежі у природних екосистемах найчастіше стають надзвичайними ситуаціями природного характеру різних рівнів. Оскільки, у процесі свого виникнення, розвитку та поширення за сприятливої дії вітру і наявності горючих матеріалів їх локалізація і ліквідація потребує великої кількості сил та засобів. Згідно з Національним класифікатором ДК 019:2010 «Класифікатор надзвичайних ситуацій» (Наказ Державного комітету з питань технічного регулювання та споживчої політики від 11.10.2010 р. № 457) пожежі у лісах належать до класу 20000 «Надзвичайні ситуації природного характеру», підкласу 20600 «Надзвичайні ситуації, пов'язані з пожежами в природних екологічних системах» групи 20610 «Надзвичайна ситуація, пов'язана з лісовою пожежею». Тобто лісові пожежі набувають характеру надзвичайних ситуацій, особливо у Чорнобильській зоні відчуження (рис. 1.1).

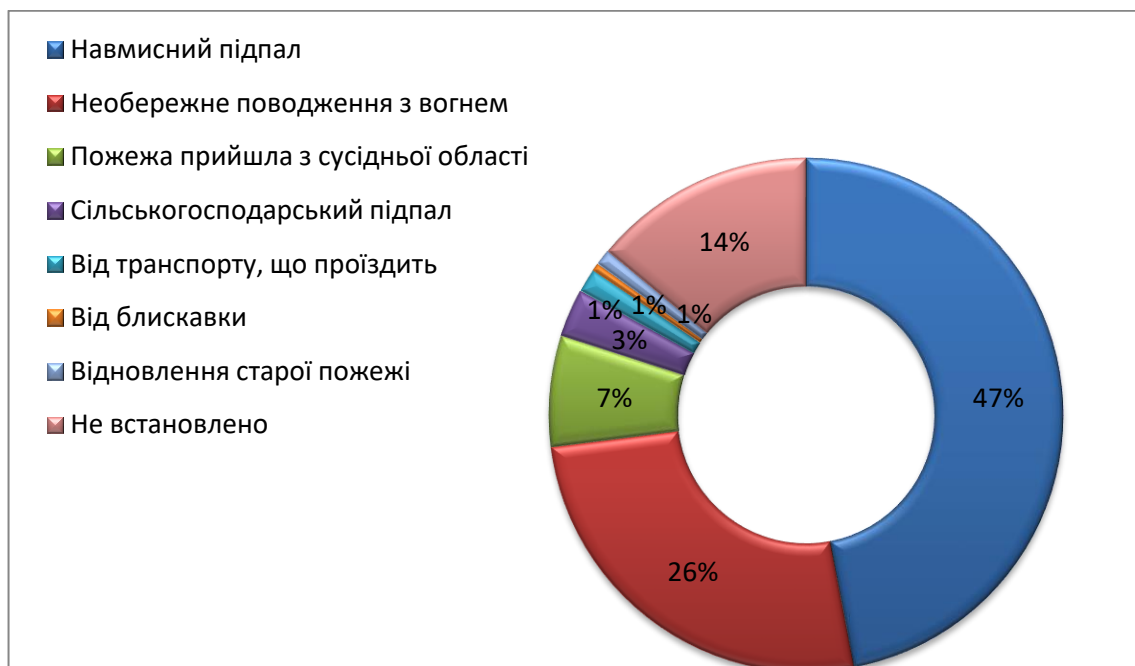


Рисунок 1.1 – Статистика виникнення пожеж у Чорнобильській зоні [71]

Лісові пожежі – один із найбільш потужних екологічних чинників, який багатогранно впливає на лісові біогеоценози, видовий склад рослинності та функціонування борельних лісів. Ліси України сформовані понад 30 видами деревних порід, серед яких домінують сосна (*Pinus silvestris*), дуб (*Quercus robur*), бук (*Fagus silvatica*), ялина (*Picea abies*), береза (*Betula pendula*), вільха (*Alnus glutinosa*), ясен (*Fraxinus excelsior*), граб (*Carpinus betulus*), ялиця (*Abies alba*). Лісові пожежі мають наступний розподіл (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Розподіл лісових пожеж за видами [183]

Гасіння лісових пожеж на початковій стадії здійснюють відповідні підрозділи лісогосподарських підприємств. При загрозі виникнення надзвичайної ситуації в період високої пожежної небезпеки до гасіння лісових пожеж залучаються підрозділи Державної служби України з надзвичайних ситуацій, обласні державні адміністрації та інші органи в межах їх повноважень [150]. Динаміку кількості лісових пожеж в Україні за 2010-2019 роки наведено на рис. 1.3.



Рисунок 1.3 - Динаміка кількості лісових пожеж в Україні за 2010-2019 роки [150]

Щороку у світі виникає близько 400 тис. лісових пожеж, які призводять до пошкодження близько 0,5% загальної площі усіх лісів та викиду в атмосферу мільйони тон продуктів горіння [123].

У деяких кліматичних умовах пожежі є природним явищем, вони відбувалися тисячоліттями, і рослини виявили здатність впоратися з ними (Pausas et al., 2008). Відомо також, що лісові пожежі є глобальним явищем, яке виникає в тропічних, помірних і бореальних регіонах (González-Pérez et al., 2004; Bowman et al., 2009). Режими пожеж модифікуються, реагуючи на поточні глобальні зміни та погане планування лісів з точки зору частоти, розміру, сезонності, повторюваності, інтенсивності та тяжкості пожежі, з шкідливим впливом на родючість і структуру ґрунту та важливими наслідками для ведення лісового господарства та стійкості (Bento -Гонсалвес та ін., 2011). У широкому дослідженні впливу вогню на екосистеми зростає інтерес і кількість літератури щодо впливу вогню на властивості ґрунту. У статті [10] розглянуто останні розробки щодо внутрішніх характеристик пожеж, інтенсивності та тяжкості пожежі, пожеж у дикій місцевості, встановлених пожеж, протипожежних режимів та заходів захисту ґрунту.

На території України 41,5 млн га (68,7% загальної площі) сільськогосподарських угідь, на яких ведуть свою діяльність 40,7 тис. підприємств, з яких 81,5 % – дрібні підприємства із площею угідь до 500 га. Наразі немає системи фінансування запобігання, виявлення та гасіння пожеж на сільськогосподарських землях. Фактично пожежі на відкритих ландшафтах гасять підрозділи ДСНС України [111]. Щодо виникнення такого роду пожеж (рис. 1.3).

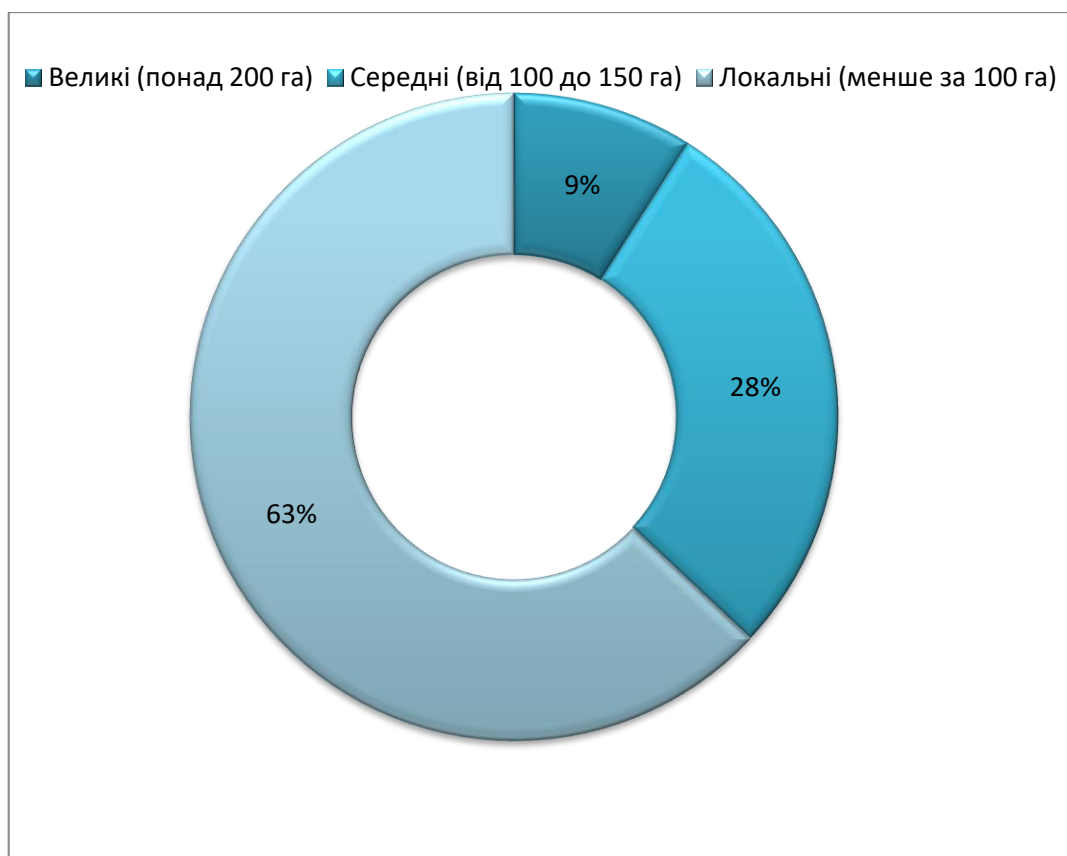


Рисунок 1.4 – Кількість лісових пожеж [71]

За даними Держлісагентства [104] підприємства систематично проводять профілактично-роз'яснювальну роботу з населенням стосовно дотримання вимог пожежної безпеки у лісах, виявлення порушників цих вимог і притягнення їх до адміністративної відповідальності. Пожежна небезпека в лісових масивах посилюється під впливом людського фактору та погодних умов навесні та в кінці літа. Понад 98 % пожеж виникає з цієї причини. Головною причиною лісових пожеж є порушення вимог пожежної безпеки в лісових масивах у період високої надзвичайної пожежної небезпеки та випалювання рослинності на

сільгоспугіддях. У галузі створена і функціонує відомча пожежна охорона, основою якої є лісові пожежні станції. Охорону лісів від пожеж забезпечують 307 державних лісогосподарських та лісомисливських підприємств, у складі яких функціонує понад 1 тисяча 700 лісництв та 273 лісові пожежні станції. Чисельність відомчої пожежної охорони складає більше 13 тисяч осіб. У лісах створена мережа із 502 пожежно-спостережних веж, з яких 337 обладнано сучасними телевізійними системами спостереження. Державні лісогосподарські підприємства, що входять до сфери управління Держлісагентства, мають: 644 пожежні автомобілі, 467 лісопожежних модулів на повноприводному шасі, 1700 тракторів з ґрунтообробним обладнанням, 1100 мотопомп, 8900 ранцевих лісових оприскувачів та інші технічні засоби [104]. У різних типах лісу пожежі протікають за різних показників (рис. 1.5).



Рисунок 1.5 – Кількість лісових пожеж в екосистемах [71]

На території Українського Розточчя та Малого Полісся (у яке переходить Жовківська частина Розточчя) нерідко виникають пожежі у природних екосистемах – лісові пожежі, горіння лучної рослинності, стерні, сміттєзвалищ та торфовищ. Такого роду пожежі, окрім знищення матеріальних цінностей, спричиняють значні викиди продуктів неповного розпаду та диму в повітря. У

Львівській області щорічно потрапляє в довкілля 4,5-5,5 т/км² різноманітних речовин (рис. 1.6).

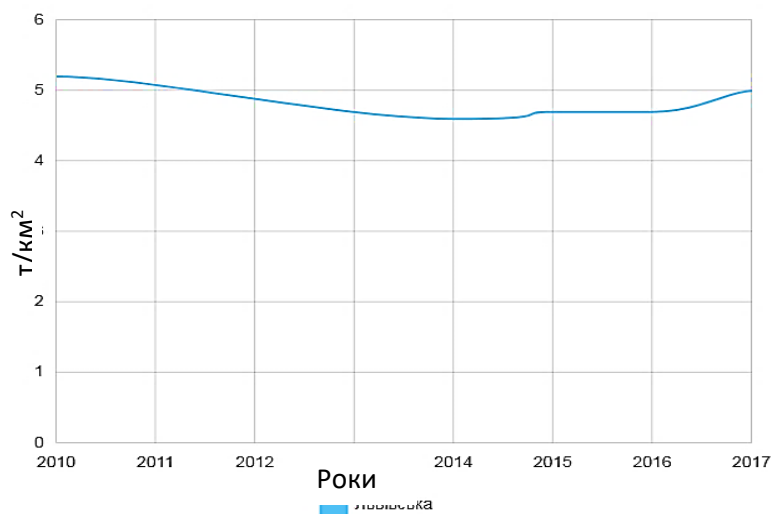


Рисунок 1.6 – Загальний обсяг викидів у Львівській області за 2010-2017 рр., т/км²
(<http://www.openenvironment.org.ua/air/#>)

Найбільші пожежі у природних екосистемах в квітні та травні 2020 року виникли на території Київської (зона безумовного (обов'язкового) відселення) та Житомирської областей. Станом на 7.00 год. 01.05.2020 р. пожежі у лісових масивах зони відчуження та безумовного (обов'язкового) відселення були локалізовані. Для облаштування протипожежних розривів залучено важку інженерну техніку ДСНС. Інженерною технікою створено 1 тис. 59 км мінералізованих смуг. Підрозділами ДСНС надавалася допомога ДАЗВ у гасінні окремих осередків тління торф'яників в осередках пройдених вогнем. До гасіння залучено 203 чоловік та 65 одиниць техніки, з них від ДСНС 145 чоловік особового складу та 35 одиниць техніки [151]. Станом на 30.04.2020 р. авіатехнікою з початку гасіння пожеж у зоні відчуження та безумовного (обов'язкового) відселення здійснено 2 тис. 354 скиди – 5 тис. 378 т води [152]. Станом на 7.00 год. 01.05.2020 р. до гасіння пожеж на території Житомирської області залучено 587 чоловік та 92 одиниці техніки, з них від ДСНС 100 чоловік особового складу та 31 одиниця техніки [151]. Внаслідок локалізації та ліквідації великих і особливо великих лісових пожеж, пожеж у природних екосистемах

залучається значна кількість особового складу та техніки. Знищуються практично усі компоненти довкілля – флора, фауна, ґрунти, забруднюються річки, водойми, повітря.

Викиди тепла і диму великих лісових пожеж змінюють динаміку атмосфери, процеси циркуляції повітряних мас, і тим самим, погодні умови в окремих регіонах [170]. Особливості рельєфу ряду населених місць, розташованих в долинах і міжгірських улоговинах, зумовлюють застійні явища повітряних мас, стійку спрямованість вітрів, тривалі періоди затишшя, що підсилює вплив інтенсивної і тривалої задимленості від лісових пожеж, створюючи серйозні загрози для здоров'я населення. Лісові пожежі є причиною зниження водорегулюючої, ґрунтозахисної, санітарно-гігієнічної, кліматичної, природоохоронної та протиерозійної ролі лісу в природних екосистемах. Знищення пожежами прибережних лісів призводить до обміління річок та швидкого розмиву їх берегів. З поверхневим стоком з лісових масивів після пожежі потрапляє в поверхневі водні об'єкти велика кількість забруднюючих речовин [170].

Кількість пожеж у природних екосистемах щороку зростає у різних регіонах України с. Зокрема, у Рівненській області щорічно на території області відбувається в середньому 190 випадків пожеж на загальній площі 12,6 тис. га. Усереднені дані свідчать про тенденцію до зростання показників горючості території, зокрема середньорічна площа пожеж за період з 2001 по 2018 рр. зростає від 7,4 до 17,8 тис. га. За результатами дослідження встановлено, що найбільше пожеж стається у березні-квітні (29,6 %), серпні (32,2 %) та вересні (19,9 %), що повинно бути основою для максимальної готовності протипожежних служб у ці періоди [110]. У Рівненській області 24 квітня 2019 року сталася масштабна пожежа у другому за величиною в Україні природному заповіднику. За попередніми даними, пожежа виникла через випалювання сухої трави. За даними, опублікованими у ЗМІ, вигоріло понад 2 га лісового масиву. Сучасні методи дистанційного зондування денної поверхні дають можливість проаналізувати вплив подібної надзвичайної ситуації пірогенного походження [118].

Польова пожежа, що спалахнула 25 липня 2021 р., у селі Хомине Ніжинського району (Чернігівська область), знищила 55 гектарів пшениці, яку не встигли зібрати. Також вогонь знищив ще 10 гектарів чагарників та сухих рослин, повідомляє SEEDS. “О 16:15 до Служби порятунку “101” м. Ніжин надійшла інформація, що поблизу с. Хомине Вертіївської територіальної громади Ніжинського району на полі фермерського господарства “Промінь” виникла пожежа пшениці на корені. О 17:55 пожежу локалізовано, а о 19:13 остаточно ліквідовано. Вогнем знищено 55 га зернової культури, 10 га сухої рослинності та чагарників. Жертв та постраждалих немає. На гасіння залучалось 13 осіб та 4 одиниці техніки, з них від ДСНС 8 осіб особового складу та 2 одиниці техніки”, – повідомили в Головному управлінні ДСНС України у Чернігівській області.

За даними досліджень В. П. Ворона, негативні зміни стану пошкоджених пожежами сосняків призводять до суттєвих втрат товарності деревини – зменшується вихід ділової деревини. Так, якщо у 60–80-річних сосняках зеленої зони м. Харкова частка ділової деревини коливається від 67 до 78%, то вже через декілька місяців після пожежі в результаті погіршення стану дерев вона зменшується до 40–55%, через 1–2 роки – 30–41%, а через 3–4 роки – до 13–17% [83].

Під час пожеж вигорає родючий шар ґрунту, який утворювався протягом тисячоліть [147, 181]. Найбільші площі ймовірних польових пожеж у регіональному розрізі мають області (тис. га): Одеська та Дніпропетровська (близько 910), Полтавська та Вінницька (830), Кіровоградська та Запорізька (815), Херсонська (понад 810). Багаторічні спостереження кліматологів свідчать про стійку тенденцію до підвищення середнього температурного режиму. А це означає, що пожежна небезпека південних та східних регіонів України погіршиться [147].

Оцінка ризику для здоров'я населення [173] від хімічного забруднення ґрунтів показала, що внаслідок лісової пожежі ймовірність отримати додаткові захворювання збільшуються з 1 класу (незначний вплив) до 3 класу (значний вплив) [173]. Ранжування хімічних речовин за значенням поелементного індексу

забруднення ґрунтів (PCS) показало, що найбільшу небезпеку викликає вміст в ґрунті марганцю і цинку. Потрапляння в підземні і поверхневі води хімічних речовин, особливо важких металів, є надзвичайно небезпечним. Дана оцінка ризику для здоров'я населення за новою авторською методикою. Значення ризику для здоров'я населення після лісової пожежі відповідають 3 класу небезпеки (значний вплив на здоров'я) [173].

У результаті досліджень науковців [73] встановлено, що пірогенна деградація поверхневих горизонтів частково осушеного торфового ґрунту істотно впливає на його загальні фізико-хімічні властивості: зміна щільності будови ґрунту, загальної пористості, вологості тощо. Окрім того, пірогенний чинник спричиняє майже повну втрату торфовим ґрунтом органогенного горизонту, потужність якого у деградованому ґрунті становить 20 см, тоді як у недеградованому ґрунті сягає 150-200 см. Пірогенна мінералізація торфу супроводжується появою великої кількості золи, з якої розчинені речовини вилугуюються атмосферними опадами та потрапляють у річкові води [73]. У районі торф'яної пожежі вплив пірогенного фактора виразно проявляється також і в хімічному складі води торф'яного кар'єру, що знаходиться поряд з вигорілими ділянками. Особливу увагу потрібно звернути на те, що при пірогенній сукцесії лісових лісових торфовищ надходження значних кількостей сполук азоту і фосфору в річкову мережу може призвести до евтрофікації водних об'єктів та різкого зниження якості річкових вод [73].

Науковцями у праці [75] встановлено, що основною загрозою біорізноманіттю рідкісних видів рослин є пожежі, які в останні роки набули великих розмірів і часто мають неконтрольований характер. Вони повністю знищують їхні оселища. Останніми великими пожежами 2002 та 2009 років були знищені декілька оселищ *Oxycoccus microcarpus* та єдине місцезнаходження *Goodyera repens* (L.) R. Br. [75].

З метою зменшення впливу лісових пожеж на екологічний стан басейнів малих річок запропоновано метод реструктуризації водозбірної площі на основі визначення оптимальних показників лісистості, розораності та залуженості [171].

Автори декларують, що відродження річок може бути досягнуте шляхом усунення причин їхньої деградації і здійснення комплексу спеціальних організаційних, агротехнічних, лісомеліоративних і інших відбудовних водоохоронних заходів на основі аналізу раціональності господарського використання їхніх водних ресурсів і земель водозбірної площі [171].

Внаслідок лісових пожеж ґрунти забруднюються хімічними речовинами, в тому числі важкими металами, що призводить до деградації екосистем. Таким чином, дослідження впливу лісових пожеж на вміст важких металів в ґрунті є дуже актуальним. Ступінь забруднення ґрунтів важкими металами залежить також від порід дерев та вікового складу лісу. Дослідження забруднення ґрунтів важкими металами внаслідок лісової пожежі в хвойному лісі Чугуївського району Харківської області (с. Маліновка) показали, що кратність перевищення валового вмісту металів за міддю складає 3,41 разів, за цинком – 2,87 разів, за марганцем – 2,24 разів.

Науковцями [81] доведено ефективність як використання глини в очищенні ґрунту в якості сорбенту, так і фіторемедіації кульбаби звичайної по відношенню до важких металів. Запропоновані технологічні заходи з відновлення якостей та покращення властивостей ґрунту екосистеми: виконання проектно-вишукувальних робіт, включаючи польові дослідження; виконання державного екологічного дослідження (моніторингу); очищення постраждалої ділянки від пошкоджених дерев; рекультивацію родючості ґрунтів відновлюваних територій, що передбачені проектуванням відновлення, в залежності від характерних особливостей ушкоджень ділянок і подальшого застосування відновлювальних територій [81].

У науковій роботі [127] досліджено зміну температури та часу займання, самозаймання, тління в процесі висушування для найпоширеніших трав'янистих рослин лук. Незважаючи на відмінності структури і щільності досліджуваних зразків трав'янистих рослин, протягом висушування спостерігається збільшення пожежної небезпеки за всіма показниками. Причинами неоднакових показників для різних рослин та відмінності їх динаміки можуть бути неоднорода структура

зразків, хімічний склад. Рослини з низькою пожежною небезпекою можуть застосовуватись для створення трав'яного покриття, яке може сповільнити поширення вогню.

У роботі [133] розглянуто стратегію розроблену європейськими ученими щодо запобігання втрати лукопасовищних угідь, використовуваних для тваринництва і виробництва продуктів харчування, а також збереження біорізноманітності в результаті наявного збільшення виробництва біомаси на енергетичні цілі. Дана стратегія включає розробку і вирішення наступних завдань і основних напрямів:

1. Визначити науково-практичні інструменти якісного використання сільськогосподарських земель у зв'язку зі зміною їх структури для багатоцільового використання, щоб припинити процес інтенсифікації на лукопасовищних угіддях і запобігти їх перетворенню на орні землі.
2. Зберегти баланс між кількістю тварин і їх потребами в кормі, виробництвом продуктів харчування і вирощуванням необхідної кількості біомаси на енергетичні цілі з раціональною структурою землекористування.
3. Розробити дієві інструменти започаткування і використання регіональних, національних і міжнародних стандартів сертифікації при виробництві біомаси з обов'язковим включенням екологічних аспектів біорізноманітності і балансу парникових газів.
4. Фінансувати наукові програми і проекти по проведенню порівняльної оцінки різних систем господарювання (інтенсивна, екстенсивна, органічна) відповідно до балансу парникових газів і виробництва біомаси для енергетичних цілей і послаблення дії кліматичних змін на стан біосфери.

У статті [124] описано результати лабораторних досліджень пожежонебезпечних властивостей найпоширеніших видів лісових горючих матеріалів. У лабораторії за стандартною методикою визначено температуру займання хвої сосни звичайної, листя дуба звичайного, граба звичайного та вільхи чорної (свіжозірваного і сухого) та сухих фрагментів надземної частини деяких трав'яних рослин і чагарників. Виявлено, що температура займання свіжозірваної

хвої є нижчою, ніж сухої. Для листя дерев спостерігається зворотна залежність, а найнижчою є температура займання листя вільхи чорної. Температура займання досліджених сухих трав'яних рослин і чагарників перебуває у межах $+220$ - $+264^{\circ}\text{C}$. Визначено і температуру полум'я під час горіння лісових горючих матеріалів, яка для деревних рослин є найбільшою для хвої сосни звичайної, а найменшою – для листя вільхи чорної.

В Україні проводяться значні дослідження пожеж у природних екосистемах. У роботі автором [87] стверджується, що температурний режим горіння підстилки і вплив теплопровідності на ґрунт та кореневу систему вивчено недостатньо. Відомі поодинокі закордонні роботи з дослідження результатів горіння підстилки в натурних експериментах із підпалом лісових ділянок, експериментального дослідження низових пожеж, вивчення горіння мульчі та впливу її горіння на ґрунт у лабораторних умовах.

Експериментально [174] встановлено, що при спалюванні рослинних решток відбувається зменшення чисельності тварин (педобіонтів) та мікроорганізмів, які беруть безпосередню участь у ґрунтоутворюючих процесах. Крім того, згубним наслідком спалювання рослинності є зменшення вмісту гумусу та забруднення повітря викидами, що разом із димом від згорання потрапляють в атмосферу. При горінні сухостою температура полум'я досягає $+300^{\circ}\text{C}$ - $+400^{\circ}\text{C}$, при цьому поверхня ґрунту нагрівається близько до $+200^{\circ}\text{C}$ - $+300^{\circ}\text{C}$ в залежності від його складу. Такий термічний вплив є короткостроковим, але достатнім для зменшення вмісту органічної речовини – гумусу та гибелі зооценозу. Листя, що тліє без доступу кисню виділяє бенз(а)пірен – речовину, що може бути причиною онкологічних захворювань. Крім того, залишки спаленого листя отруюють ґрунт, призводячи до зниження ферментативної активності верхнього шару. Біологічне різноманіття є невід'ємною складовою довкілля та основою існування людини. Будь-який вплив на нього призводить до порушення цілісності екосистеми. Однією з причин порушення рівноваги в екосистемі є явище сезонного спалювання сухої рослинності [174].

У роботі [74] досліджено розподіл обмінних, водорозчинних катіонів та їхній хімічний склад у темно-сірих опідзолених ґрунтах Малехівського пасма Пасмового Побужжя в умовах їх постпірогенної трансформації. В процесі пожежі у досліджуваний ґрунт потрапляє зола рослинності, яка трансформується в розчинні форми. За цих умов виявлено депонування катіонів у підорному горизонті на глибині понад 30 см, а концентраційні їх зміни виражені в шарі 0-5 см. Показано зсув актуальної кислотності ґрунтів у нейтральну область та ущільнення ґрунту після пожежі рослинного покриву [74].

Авторами [96] проаналізовано підпали сухої рослинності на Карпатських полонинах і їх наслідки на довкілля та здоров'я місцевого населення. Встановлено, що впродовж останніх років часто відбувається інтенсивне випалювання сухої трави як на заповідних територіях гірських Карпат, так і на інших просторах України. Саме тому відповідні фахівці структурних підрозділів ДСНС України виявляють значну цікавість до ідеї створення загального інформаційно-технологічного простору в масштабах країни або групи країн, об'єднаних взаємними обов'язками у сфері прогнозування, виявлення та оцінювання наслідків надзвичайних ситуацій природного характеру: повеней і паводків, лісових пожеж та пожеж на відкритих Карпатських полонинах, а також різних метеорологічних явищ [96].

У науковій статті [124] описано результати лабораторних досліджень пожежонебезпечних властивостей найпоширеніших видів лісових горючих матеріалів. У лабораторії за стандартною методикою визначено температуру займання хвої сосни звичайної, листя дуба звичайного, граба звичайного та вільхи чорної (свіжозірваного і сухого) та сухих фрагментів надземної частини деяких трав'яних рослин і чагарників. Виявлено, що температура займання свіжозірваної хвої є нижчою, ніж сухої. Для листя дерев спостерігається зворотна залежність, а найнижчою є температура займання листя вільхи чорної. Температура займання досліджених сухих трав'яних рослин і чагарників перебуває у межах +220-+264°C. Визначено і температуру полум'я під час горіння лісових горючих матеріалів, яка для деревних рослин є найбільшою для хвої сосни звичайної, а найменшою — для

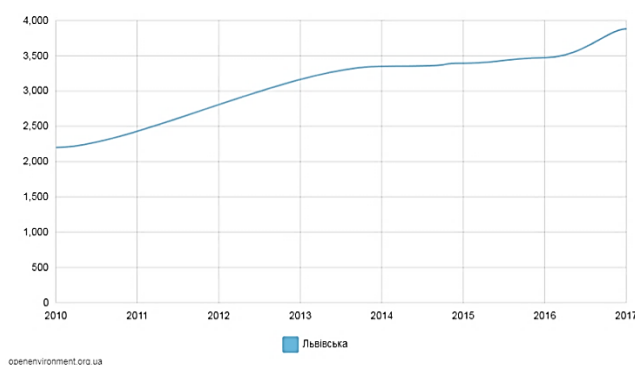
листя вільхи чорної [124]. Зокрема, у роботі [120] наведено результати досліджень пожежної безпеки рослин наземного ярусу в лісах різних типів лісорослинних умов. Пожежну безпеку рослин визначено за шкалою Мелехова (пожежонебезпечні, слабозаймисті та вогнестійкі), розширеною представниками, поширеними в лісах Малого Полісся. Під час польових досліджень пожежну безпеку пробних ділянок оцінено за вологістю верхнього шару підстилки та діаметром її вигоряння [120].

Дослідження [7] присвячені оцінці впливу віку деревостану на органічний вуглець ґрунту (SOC). Встановлено, що SOC зберігається головним чином в ґрунтах з розміром часток > 10 мм і 2–5 мм. Накопичення SOC під час заліснення відбувається переважно в макроагрегатах, які мають швидший повітрообмін, ніж мікроагрегати. Ґрунти зрілих та перезрілих лісів все ще мають високий рівень зберігання вуглецю, особливо у глибших шарах ґрунту (60–80 см, 80–100 см).

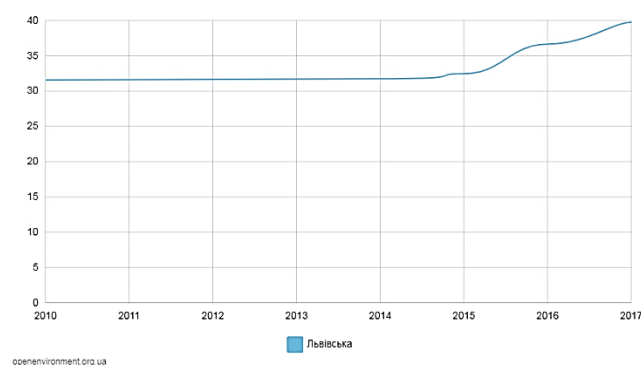
У роботі [28] відображено дослідження ґрунтів у післяпожежний період. На контрольній ділянці властивості ґрунту залишалися незмінними протягом 2 років моніторингу, а мікробні параметри, постраждалі від пожежі, відновлювались швидше на контрольній ділянці, ніж на відновлювальній ділянці. Відновлення рослин також показало деякі відмінності - за кількістю видів відмінностей на ділянках майже не спостерігалось, проте на дослідній ділянці кількість видів була вищою, аніж на контрольній. Було вивчено вплив лісових пожеж та відновлювальних дій на вміст та структуру органічної речовини ґрунту в під сосною (*Pinus pinea*) з Національного парку Доняна (Південна Іспанія) [32]. Зразки відбирали із вигорілих ділянок до та після пожежної реставрації та порівняно з незгорілою ділянкою. Встановлено, що дії з управління ґрунтом після пожежі призводять до збільшення ароматичності, що відповідає накопиченню лігніну та поліциклічних ароматичних сполук. Це передбачає додаткові надходження обвугленої лігноцелюлозної біомаси, включаючи чорний вуглець, яка була включена в ґрунт під час реабілітаційних практик.

Наукова праця [46] відображає дослідження наслідків пожежі, яка сталася >50 років тому в помірному тропічному лісі, яка спричинила повені в Пладик

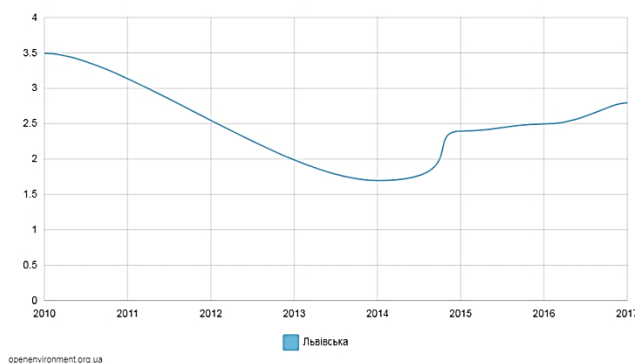
Андосол (Чилі). Встановлено, що викиди CO_2 із ґрунтів були вищими в незгорілому лісі, ніж у згорілому, і позитивно корелюють з температурою і негативно із вмістом ґрунтової води на обох ділянках. Обидві ділянки були поглиначами CH_4 (вище в незгорілому лісі), а потоки позитивно корелювали із вмістом ґрунтової води та негативно з температурою (сильніше відношення в згорілому лісі). Викиди N_2O були низькими на обох ділянках. Таким чином, лісові пожежі та пожежі у природних екосистемах спричиняють потрапляння в атмосферу значної кількості летких продуктів горіння та небезпечних речовин і сполук. Поряд із цим, у Львівській області з року в рік зростають викиди небезпечних речовин у довкілля, джерелами яких є промислові підприємства, транспорт та об'єкти інфраструктури. На рис. 1.7 зображено викиди небезпечних речовин на території Львівщини за період 2010-2017 років (оксид вуглецю, діоксид вуглецю, діоксид сірки, неметанові органічні сполуки).



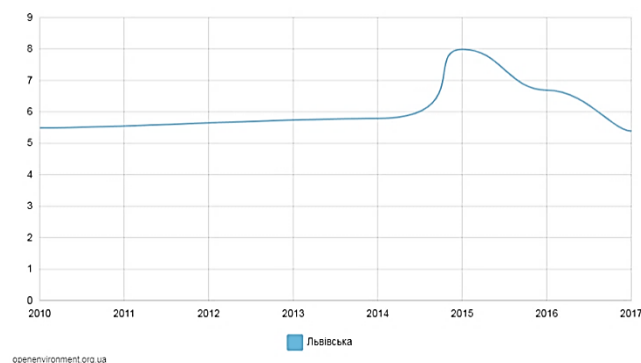
а) Викиди діоксиду вуглецю у Львівській області, тис. тон



б) Викиди діоксиду сірки у Львівській області, тис. тон



в) Викиди неметанових органічних сполук у Львівській області, тис. тон



г) Викиди оксиду вуглецю у Львівській області, тис. тон

Рисунок 1.7 - Викиди небезпечних речовин на території Львівщини за період 2010-2017 років (за даними <http://www.openenvironment.org.ua>)

З огляду на вищенаведені результати експериментальних досліджень та статистичних даних можна зробити заключення, що особливості впливу ландшафтних пожеж на біоту і їх профілактика потребує більш глибоких досліджень.

Пожежі є основною загрозою для людей та майна Wildland Urban Interface (WUI) у всьому світі, але WUI в Північній Америці, Європі та Океанії були вивчені раніше, ніж у Латинській Америці [5]. Науковцями досліджено пожежну небезпеку дикої місцевості та міста двох долин у Бутані (Тхімпху та Джакар), де людські поселення та інфраструктура оточені сосновими лісами (*Pinus wallichiana*). Застосовано FlamMap, просторово чітку модель симуляції лісової пожежі, щоб імітувати поведінку пожежі за чотирьох кліматичних сценаріїв. Як індикатори поведінки вогню використовували довжину полум'я, швидкість поширення, активність вогню, ймовірність опіку та розміри вогню. На основі результатів моделювання побудували карту пожежної небезпеки, що показує виникнення лісових пожеж. FlamMap прогнозує дворазове збільшення пожежної небезпеки для обох досліджуваних областей через кліматичні зміни [64].

У листопаді 2016 року горіла суха рослинність в місті Хайфа на півночі Ізраїлю. Однак не лише пожежа загрожувала міським районам. Опави після пожежі можуть перерости в міські повені, що ще більше посилить збитки від пожежі. Через кілька місяців після пожежі було розпочато значне відновлення згорілих територій та пом'якшення наслідків у майбутньому. Для міських лісів стратегія відновлення була спланована та реалізована відповідно до топографічної структури згорілої ділянки та передбачуваної ерозії ґрунту. Відповідно, були використані різні методи управління після пожежі: лісозаготівля, заліснення, бар'єри [65].

Несприятливі наслідки для здоров'я, пов'язані з впливом викидів від лісових пожеж, створюють проблеми для здоров'я населення та клінічні проблеми. Згідно з систематичними оглядами, існує позитивний зв'язок між впливом диму від лісової пожежі або твердих часток лісової пожежі ($PM_{2,5}$) і

смертністю через респіраторну захворюваність. Респіраторна захворюваність включає астму, хронічну обструктивну хворобу легень, бронхіт та пневмонію [15].

У публікації [21] оцінено вплив лісової пожежі Маті (Аттика) на ерозію ґрунту. Подія спричинила 102 смертельні випадки та наслідки для локальної інфраструктурної мережі, економіки, природних ресурсів [21]. Науковці [22] декларують, що їх моделі встановлюють, що такі райони, як Північна Каліфорнія, Орегон та Айдахо на заході, а також Флорида, Луїзіана та Джорджія на Сході, найбільше постраждали від пожеж у дикій природі у вигляді додаткових передчасних смертей та госпіталізації до лікарень. Кількісна оцінка поведінки вогню в польових умовах необхідна для покращення поточного наукового розуміння пожеж на відкритій місцевості та для розробки і перевірки відповідних моделей, заснованих на законах фізики. Зокрема, потрібні детальні описи окремих пожеж до яких доступна література обмежена [43].

За останні десятиліття площа лісових пожеж на Гаваях, збільшилася в чотири рази. Горючий матеріал та кліматична неоднорідність створюють значні проблеми для оцінки пожежного ризику та управління пожежами. Вплив попередніх вологих років на ризик пожеж може покращити короткострокові прогнози ризику пожежі на Гаваях, тоді як кліматичні прогнози вказують на те, що управління пожежами має бути пріоритетним на висотах, де зосереджені природні ресурси високої цінності [61]. Науковці [62] вивчали вплив вогню на ємність катіонного обміну ґрунту (СЕС), порівнюючи сильно випалені ґрунти з сусідніми незгорілими ґрунтами на п'яти лісових та лісових ділянках у Каліфорнії, США [62].

Пожежа є основним типом порушення в лісових і чагарникових екосистемах в Галіції (Іспанія). Для мінімізації впливу пожежі на постраждалі екосистеми часто використовуються методи стабілізації та відновлення ґрунту. Однак інформація про специфічний вплив цих практик після пожежі на мікробіоту ґрунту є низькою [25]. Після пожежі в ґрунті концентрації $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, P , Na , K , Mg , Ca , Mn , Cu , Zn , B зростають, тоді як $\text{NO}_3^- - \text{N}$, Al , Fe та Co суттєво не змінюється.

Незважаючи на значне зниження з часом, концентрації Mg, Ca та Mn наприкінці дослідження все ще були вищими, ніж у незгорілому ґрунті, тоді як концентрації K, Cu, Zn та B були подібними до рівнів до пожежі та $\text{NH}_4^+\text{-N}$, P і Na були нижче значень до пожежі [85]. Низька інтенсивність пожежі на схилі не мала істотного впливу на дихання ґрунту чи мікробну біомасу. Через 20 годин після пожежі вищої інтенсивності на схилі з високим горючим навантаженням дихання ґрунту посилювалося і залишалося високим протягом кількох місяців. Таким чином, мікробна біомаса ґрунту не відігравала значної ролі в обмеженні втрат поживних речовин після пожежі [67]. Активність фенолоксидази після пожежі зросла на 20–80%. Активність хітинази змінилася незначно [12].

У світовому контексті дослідження пожеж в природних екосистемах є актуальним питанням сьогодення.

1.2. Чинники впливу на виникнення та поширення лучних пожеж

В Україні, практично, щороку виникають катастрофічні пожежі у природних екосистемах, які класифікуються як надзвичайні ситуації природного характеру загальнодержавного рівня. За даними Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України, починаючи із 1991 року кожне наступне десятиріччя було теплішим від попереднього: 1991–2000 – на 0,5 °С, 2001–2010 – на 1,2 °С, 2011–2019 – на 1,7 °С. Клімат став більш посушливим. На всій території України спостерігається тенденція до зменшення кількості опадів (менше 400 мм) у теплий період, а посухи спостерігалися в районах, в яких їх раніше не було [82]. Науковці [82] декларують, що досягнення нового сприйняття ризику прояву природних загроз, потребує підвищення обізнаності щодо них. Тому, для вдосконалення системи запобігання виникнення і ліквідації наслідків природних небезпек, визначення напрямів управління ризиками потрібно розробити відповідну стратегію регіонального розвитку на державному та регіональному рівнях, вдосконалити механізм управління ризиками, сформувати нові управлінські підходи та конкретні засоби їх реалізації, створити відповідні фонди

для запобігання виникнення надзвичайних ситуацій та ліквідації їх наслідків, що дасть можливість зростанню й розвитку регіонів України [82].

За даними досліджень [77] найвищі показники вірогідності виникнення лісових пожеж і збитку від них характерні для хвойних молодняків і середньовікових насаджень півдня, сходу і Полісся України. Загальна площа таких насаджень, за даними Держлісагенства України, складає понад 2 млн. га. Через свою пожежну небезпеку ці насадження в складних природно-кліматичних умовах вимагають постійної уваги з боку лісогосподарських підприємств щодо посиленої їх охорони і збереження від вогню. Степові пожежі і пожежі хлібних масивів є найбільш небезпечними в періоди стійкої посушливої погоди. Швидкість розповсюдження пожежі досягає подекуди 700 м/хв. Наявність вітру збільшує швидкість розповсюдження полум'я, а також сприяє перенесенню іскор повітряними потоками до масивів, які ще не горять. Іноді при таких пожежах утворюються так звані смерчі, які сприяють переходу вогню через природні і штучні перешкоди (річки, дороги, смуги, що переорали, і так далі), шириною до 12 м. Степові пожежі, пожежі лук, полів і хлібних масивів можуть переходити в лісові, торф'яні пожежі і викликати пожежі населених пунктів, сільськогосподарських і промислових підприємств, прилеглих територій. Навесні, традиційно, значна кількість ландшафтних пожеж виникають в результаті випалювання сухої рослинності та її залишків на сільгоспугіддях, поблизу автомобільних і залізничних шляхів, парках і т. д. [77].

Умовам та наслідкам, які сприяють пожежам у природних екосистемах присвячено чимало наукових праць, проте всі вони передбачають дослідження хвойних порід, зокрема сосни звичайної. Так, у роботі [185] наведені результати досліджень пожежної небезпеки соснових молодняків залежно від віку у Малому Поліссі із застосуванням комп'ютерного моделювання лісової пожежі у фізичній моделі Wildland-Urban Fire Dynamics Simulator (WFDS). Встановлено, що перехід низової пожежі у верхову форму відбувається в насадженнях віком до 20 років, що спричиняє збільшення швидкості поширення пожежі та свідчить про зростання пожежної небезпеки.

Науковцями [100] досліджено вплив низової пожежі різної інтенсивності на санітарний стан і ріст соснових деревостанів Центрального Полісся України. Виявлено закономірний, прямий зв'язок між категорією стану дерева та його дефоліацією, обернену помірну кореляцію стану дерева від його діаметра, а також тісний зв'язок категорії стану дерева з нижньою висотою нагару. Також досліджено [99] постпірогенне природне поновлення у соснових насадженнях Поліського природного заповідника після низових пожеж різної інтенсивності. Встановлено залежність кількості поновлення сосни звичайної від середнього віку насадження. Проаналізовано розповсюдження, вікову і висотну структуру підросту та характер його розміщення на площі тощо.

Досліджувалися умови та способи переходу низової пожежі у верхову. Описано основні способи та умови, які сприяють такому переходу: займання полум'ям, іскри, теплопередача, вертикальне горіння стовбурів та поширення вогню ярусами як всередині лісу, так і узліссям [126]. Встановлено [121], що радіалі та латералі впливають на пожежонебезпечні властивості опаду і підстилки, які встановлені на підставі результатів експериментальних досліджень пожежної небезпеки в лісових насадженнях Малого Полісся.

У роботі [85] наведено дані щодо пошкодження стовбурів сосни при низових пожежах. Авторами виявлено достовірну кореляційну залежність індексу стану та частки всихаючих і сухостійних дерев від пошкодження стовбура вогнем. Як критерій прогнозу стану пошкоджених пожежею сосняків запропоновано використовувати різницю висоти грубої кори і нагару на стовбурі. Науковці [86] декларують, що домінування типу пошкодження, залежить не тільки від виду пожежі, але і від сезону пожежі, характеристик деревостану, едатопу. Визначено особливості післяпожежного розвитку сосняків Рівненщини у різних едатопах, з різним періодом після пожежі та типом пошкодження. Досліджено роль різної величини пошкодження сосняків внаслідок низових пожеж на їх санітарний стан тощо.

Проведені дослідження [70] в натурних умовах свідчать про те, що вміст радіоактивних часток диму в приземному шарі атмосфери Зони відчуження може

різко збільшуватися на декілька порядків через лісові пожежі. Короткочасний (кілька діб) підвищений вміст радіоактивних продуктів згоряння в приземному шарі повітря може досягати рівня значень радіаційної небезпеки для довкілля і безпосередньо для життєдіяльності населення, яке проживає в чистій зоні на значних відстанях (до 30 км по осі сліду) від місця лісової пожежі [70].

У статті [188] науковцями проаналізовано причини виникнення пожеж у лісах, що ростуть на Нижньодніпровських пісках Херсонщини. Визначено відмінності у градації класів пожежної небезпеки лісових масивів на території Нижньодніпровських пісків та інших насаджень. Виявлено основні причини виникнення пожеж у лісових масивах на території Нижньодніпровських пісків за п'ятнадцятирічний часовий проміжок. Проведено аналіз виникнення лісових пожеж у різних районах Херсонської області. Визначено пожежі, що завдали найбільшої матеріальної та екологічної шкоди на сучасному етапі лісокористування [188]. Описано сучасний стан дерев на дослідних площах, закладених в деревостанах, що потерпали від низової пожежі 2007 р. Досліджено зміну категорій стану дерев і стійкість видів сосни до впливу низових пожеж за період проведення досліджень. Визначено стовбурових шкідників в уражених пожежею соснових деревостанах. Описано динаміку дехромації та дефоліації дерев на дослідних площах за десятирічний період [188].

Науковці у праці [129] доводять, що особливості ліквідації лісової пожежі в радіаційно забрудненій зоні полягають у виборі способу гасіння, задіянні відповідних сил і засобів, які дають змогу ефективно здійснити локалізацію та ліквідацію пожежі. Окрім традиційних загроз, пов'язаних з ви-конанням завдань щодо гасіння лісових пожеж, за наявності радіоактивного забруднення додатково слід враховувати чинники небезпеки, пов'язані з радіацією, і застосовувати відповідні засоби захисту. У випадку значних за площею та інтенсивністю пожеж слід застосовувати пожежну авіацію, яка дасть змогу не лише погасити пожежу, а й уникнути безпосереднього контакту пожежників з радіаційно забрудненим середовищем [129].

Зазначено [138], що на забруднених аварійними викидами Чорнобильської АЕС територіях, природна рослинність відіграє роль стабілізатора радіоекологічної ситуації. За стабільних процесів сукцесії винесення речовин за межі ландшафту практично відсутнє і значно зменшує вторинне забруднення прилеглих територій радіонуклідами. Запропоновано методологію і критерії оцінки стану рослинного покриву засобами дистанційного зондування Землі і методами геоінформаційних технологій. Отримано карту просторового розподілу ушкодженої пожежею рослинності, яка містить: типи рослинних угруповань (біоценоз), тип насаджень лісу (хвойний, листяний, мішаний) та трав'янистої рослинності, ступінь ушкодження, їх площу, часові терміни пожежі [138]. Після аварії в зоні відчуження і зоні безумовного обов'язкового відселення ЧАЕС зміни в рослинному покриві та об'єктах природокористування відбувалися в двох напрямках — деструктивному та поновлювальному. Внаслідок припинення агровиробництва, сільськогосподарські землі: рілля, сіножаті і пасовища, перейшли у категорії перелогів (суходільних луків) та заплавних луків із зміною видового складу рослин. На суходільних луках приурочених до сухіших і бідніших ґрунтів домінують формації костриці червоної (*Festuca rubra*), пирію повзучого (*Elytrigia repens*), тонконогу вузьколистого (*Poa angustifolia*), мітлиці тонкої (*Agrostis capillaris*). До біоценозів, що відповідають низинним заболоченим формам рельєфу входять осоки та водо-болотна очеретяна рослинність [138].

Авторами у роботі [84] експериментально виявлено особливості зміни температури в різних шарах лісової підстилки в повітряно-сухому та в абсолютно сухому стані під час проходження через них фронту горіння. Для повітряно-сухих монолітів підстилки зі свіжого бору максимальна температура від нижніх до верхніх шарів змінювалась в інтервалі $+131^{\circ}\text{C}$ — $+295^{\circ}\text{C}$. Порівняльний пошаровий аналіз температур горіння підстилки свідчить, що у разі збільшення глибини підстилки швидкість фронту горіння зменшується. Винятком є поверхня монолітів, на якій, окрім виділенням тепла, під час горіння відбувається й одночасне охолодження конвективними потоками повітря. Посилення повітряних потоків призводить до зростання температури та швидкості горіння підстилки. Це

відбувається завдяки зростанню конвекції в поверхневих шарах підстилки та збільшенню доступу кисню в глибинні шари підстилки, що посилює інтенсивність горіння і підвищує температуру в цих шарах [84].

У роботі [28] відображено дослідження ґрунтів у післяпожежний період. На контрольній ділянці властивості ґрунту залишалися незмінними протягом 2 років моніторингу, а мікробні параметри, постраждалі від пожежі, відновлювались швидше на контрольній ділянці, ніж на відновлювальній ділянці. Відновлення рослин також показало деякі відмінності - за кількістю видів відмінностей на ділянках майже не спостерігалось, проте на дослідній ділянці кількість видів була вищою, аніж на контрольній.

Було вивчено вплив лісових пожеж та відновлювальних дій на вміст та структуру органічної речовини ґрунту в під сосною (*Pinus pinea*) з Національного парку Доняна (Південна Іспанія) [32]. Зразки відбирали із вигорілих ділянок до та після пожежної реставрації та порівняно з незгорілою ділянкою. Встановлено, що дії з управління ґрунтом після пожежі призводять до збільшення ароматичності, що відповідає накопиченню лігніну та поліциклічних ароматичних сполук. Це передбачає додаткові надходження обвугленої лігноцелюлозної біомаси, включаючи чорний вуглець, яка була включена в ґрунт під час реабілітації.

Наукова праця [46] відображає дослідження наслідків пожежі, яка сталася >50 років тому в помірному тропічному лісі, яка спричинила повені в Плачик Андосол (Чилі). Встановлено, що викиди CO_2 із ґрунтів були вищими в незгорілому лісі, ніж у згорілому, і позитивно корелюють з температурою і негативно із вмістом ґрунтової води на обох ділянках. Обидві ділянки були поглиначами CH_4 (вище в незгорілому лісі), а потоки позитивно корелювали із вмістом ґрунтової води та негативно з температурою (сильніше відношення в згорілому лісі). Викиди N_2O були низькими на обох ділянках.

Результати дослідження [19] показують, що абсолютна вологість і температура самозаймання окремих видів рослин обумовлюють відмінності їх протипожежних властивостей. За результатами комплексного термічного аналізу для кожного виду рослин при різних температурах відбуваються три стадії:

випаровування вільної та зв'язаної води, самозаймання зразків та горіння вуглекислих залишків. Максимальний екзотермічний ефект характеризувався різним значенням температури, а також зольністю, яка перешкоджає процесу горіння.

У роботі [120] описано результати досліджень пожежної небезпеки рослин наземного ярусу в лісах різних типів лісорослинних умов. Пожежну небезпеку рослин визначено за шкалою Мелехова (пожежонебезпечні, слабкозаймисті та вогнестійкі), розширеною представниками, поширеними в лісах Малого Полісся. Під час польових досліджень пожежну небезпеку пробних ділянок оцінено за вологістю верхнього шару підстилки та діаметром її вигорання. Ці показники залежать від загальної кількості рослин наземного ярусу на 1 м² та проективного покриття. З урахуванням цього та пожежної небезпеки рослин встановлено, що пожежна небезпека ділянок зменшується із зростанням індексів трофності та вологості.

Авторами [174] обґрунтовано вплив спалювання сухої рослинності на загальний вміст вуглецю, актуальну кислотність та зміни кількісного складу основних угруповань герпетобіонтних членистоногих, що відіграють важливу роль у формуванні трофічних ланцюгів та деструкції органічної речовини. Встановлено, що термічний вплив призводить до зменшення вмісту органічної речовини та змін актуальної кислотності ґрунту. Показано, що індекс біорізноманіття Шеннона вищий для досліджуваних ділянок до випалювання трав'янистої рослинності (1,55), ніж після (1,43). Спалювання сухої рослинності спричинює безпосередній негативний вплив на біорізноманіття територій.

У роботі [96] автори проаналізували причини цілеспрямованих підпалів сухої рослинності на Карпатських полонинах і їх наслідки на довкілля та здоров'я місцевого населення. Встановлено, що впродовж останніх років часто відбувається інтенсивне випалювання сухої трави як на заповідних територіях гірських Карпат, так і на інших просторах України. Саме тому останнім часом відповідні фахівці структурних підрозділів ДСНС України виявляють значний інтерес до ідеї створення загального інформаційно-технологічного простору в

масштабах країни або групи країн, об'єднаних взаємними обов'язками у сфері прогнозування, виявлення та оцінювання наслідків надзвичайних ситуацій природного характеру: повеней і паводків, лісових пожеж та пожеж на відкритих Карпатських полонинах, а також різних метеорологічних явищ.

Радіаційний теплообмін є домінуючим механізмом нагріву для кутів схилу від 0° до 22° , а конвекційний механізм теплопередачі стає актуальним і стає важливішим за випромінювання для схилів 31° і 45° . Як і в інших дослідженнях, було виявлено «критичний» кут 22° . Для кутів схилів, більших за критичне значення, спостерігаються значні зміни вітрових умов біля основи полум'я, що призводить до більш швидкого збільшення швидкості поширення зі збільшенням нахилу [54].

У дослідженні [3] кінетика піролізу була визначена для 14 різних видів рослин (живих і мертвих), які є притаманними для лісів на півдні США. Енергії активації, отримані в цьому дослідженні, було порівняно з літературними, і результати показали, що середні енергії активації, отримані в цьому дослідженні для типів трави, широколистих і хвої, дуже близькі до середніх енергій активації, отриманих для різних видів соломи про які повідомляється в літературі.

Розроблено термодинамічну модель утворення диму [9]. Експерименти в екологічно кондиційованій аеродинамічній трубі з використанням хвої з довголистої сосни (*Pinus palustris* Mill.) забезпечили видимість, тепловий потік, температуру, вологість і дані про частинки для перевірки моделі [9].

У [11] досліджували відповідність між тепловими картами ймовірності загоряння та площами горіння, які спостерігалися в наступні роки для п'яти досліджуваних територій в Альберті (Канада). Спостереження за згорілими площами включали 138 пожеж, які знищили 543,049 га лісів [11].

У 2012 році велика пожежа спалахнула на верхніх південно-західних схилах гори Кенія. Пожежа виникла на висоті 3300–4000 м і охопила 100 км². Вплив цієї пожежі на властивості ґрунту досліджується через три роки після пожежі. Серйозність пожежі була визначена за допомогою супутникового індексу, відомого як dNBR (різниця нормалізованого коефіцієнта горіння). Це було

використано для ідентифікації вогню: області низької, середньої та високої тяжкості. Встановлено, що вплив вогню на властивості ґрунту в тропічних альпійських болотах гори Кенія є незначним через 3 роки [59].

Вдосконалені моделі поширення пожежі в природних екосистемах нададуть землевпорядникам та державним установам кращі інструменти для визначення профілактичних заходів та обробки горючих матеріалів перед пожежею, а також розподілу ресурсів для гасіння та видачі наказів про евакуацію людей і цінностей під час пожежі [23]. Зміни властивостей ґрунту не являли собою серйозну деградацію ґрунту, і через 13 років не було горіння на межі між природою та містом [26].

Оцінено [30], як погода, горючий матеріал та рельєф перешкоджали поширенню вогню у чотирьох великих досліджуваних районах на заході США, трьох у Північних Скелястих горах та одній на південному заході. Результати з'ясовують різну регіональну роль погоди, горючих матеріалів та топографії у перешкодженні поширення вогню, підкреслюючи унікальні біофізичні умови та режим пожежі кожної екосистеми [30].

Тління є домінуючим процесом горіння торфовищ, при якому в атмосферу виділяється велика кількість вуглецю та диму. Поширення тління на торфовищах є багатовимірним процесом, який є повільним, низькотемпературним, стійким і який важко виявити [31, 48].

У статті [18] описуються механізми теплопередачі, які діють, коли тепло рухається вниз у ґрунті вздовж температурних градієнтів під час лісових пожеж. Передача тепла вниз у верхній частині ґрунту посилюється випаровуванням і переміщенням води та органічних сполук. Узагальнено та обговорено наявну інформацію про зміни в хімії випарених органічних сполук. Наведено операційну теорію, що описує формування висоководонепроникного стану ґрунту під час пожежі. Розглянуто та узагальнено світову літературу, що описує водовідштовхувальні властивості, викликані вогнем.

Досліджено вплив пожежі на властивості ґрунту та на післяпожежну регенерацію та динаміку рослинності протягом 14 років після лісової пожежі у

вологодному сосновому лісі на торф'яно-грунтовому ґрунті з товстим шаром органічної речовини. Виявлено, що пожежа суттєво змінила властивості ґрунту та, залежно від його тяжкості, по-різному вплинула на колонізацію та розвиток дерев та чагарників. На вологодому і багатшому ґрунті успіх колонізації піонерських порід дерев зростає із збільшенням споживання органічного шару ґрунту, викликаного пожежами [20]. Для аналізу фізико-хімічних властивостей відбирали зразки ґрунту з верхнього шару ґрунту (0-4 см). Отримані результати показують, що загальний стік і вихід наносів значно змінювалися як у просторі, так і в часі. Висока просторова мінливість у масштабі ділянки разом із відносно низькою інтенсивністю пожежі та добре структурованим і стабільним ґрунтом вважалися основними причинами дуже низького стоку та виходу наносів на мезомасштабі (схилі) [35].

1.3. Аналіз моделей виникнення та поширення лучних пожеж

Великі лісові пожежі можуть охоплювати мільйони гектарів лісу щороку по всьому світу, спричиняючи втрати природних екосистем. Моделювання пожежі надає аналітичну схему для характеристики та прогнозування поведінки та поширення пожежі в різних середовищах. Просторова динаміка великих лісових пожеж може бути проаналізована за допомогою супутникових даних про активну пожежу, що є економічно ефективним способом систематичного отримання інформації у всьому світі. Змодельований ріст трьох великих пожеж у дикій місцевості у США, Чилі та Іспанії з різною схемою поширення, тривалістю та розміром було порівняно з даними супутникових активних пожеж [14].

Прогнозування пожежної небезпеки за умов погоди у світі використовують різні методики, найпоширенішими є Канадська система (Canadian Forest Fire Danger Rating System), яку застосовують у багатьох країнах Європейського Союзу. У США є власна національна система (National Fire Danger Rating System). В Україні з 1960-х рр. використовують комплексний показник пожежної небезпеки за умов погоди з деякими удосконаленнями – урахуванням опадів за

минулу добу [111]. Кожну пожежу реєструють супутники, а численні продукти з картами пожеж дають можливість безкоштовно, у вільному доступі отримати інформацію про пожежі (FIRMS, WorldView, OroraTech, GOFC-GOLD, EFFIS та ін.), що спрощує доступ до фактичних даних про пожежі у природних ландшафтах [111].

Більша частина Сполучених Штатів переживає тривалі пожежні сезони зі збільшенням частоти пожеж високої тяжкості та ризику пожежі. Керівники пожежної служби на південному заході Сполучених Штатів докладають більше зусиль для зниження ризику пожежі, керуючи більшою кількістю пожеж для досягнення ресурсних цілей (наприклад, розрідження лісів, зменшення горючого матеріалу та відновлення ландшафту) [69].

Науковцями [131] проведено дослідження пожежної небезпеки ділянок, вкритих трав'яною рослинністю, від середньої висоти рослин та швидкості вітру із застосуванням комп'ютерного моделювання трав'яної пожежі у середовищі фізичної моделі Wildland-Urban Fire Dynamics Simulator (WFDS). За результатами моделювання отримано [131] значення швидкостей поширення фронту пожежі на трав'яних ділянках. Найбільшою є швидкість пожежі за висоти трав'яного покриву 40 см та швидкості вітру 3 м/с, а найменшою – за висоти трав'яного покриву 60 см та швидкості вітру 0 м/с. Встановлено залежність, яка описує динаміку пожежі за висотою трав'яного покриву як горючого матеріалу [131].

Якщо система моніторингу довкілля з використанням програмного забезпечення «Copernicus» (CAMS) [42] надає інформацію про реальну кількість пожеж у всьому світі, то метеорологічний показник пожежної небезпеки (*FWI*) [184] на основі зміни метеорологічних показників допомагає прогнозувати рівень пожежної небезпеки [42, 184]. Експерти *EFFIS* використовують цей показник для складання короткострокових прогнозів рівня пожежної небезпеки, а співробітники Служби моніторингу зміни клімату (*C3S*) – з метою довгострокового прогнозування, оскільки це дозволяє оцінити інтенсивність пожежі, яка залежить від швидкості її поширення та кількості горючого матеріалу [42, 184].

У роботі [131] проаналізовано математичні моделі створені вітчизняними науковцями за останні роки. З'ясовано, що наукові дослідження пов'язані з математичним моделюванням пожеж в природних екосистемах мають здебільше прикладне значення, що спрямовані на забезпечення пожежної безпеки лісів і ліквідацію ландшафтних пожеж. Пріоритетними для математичного моделювання залишаються лісові пожежі, не дивлячись на те, що в останні роки кількість інших ландшафтно-однорідних пожеж суттєво збільшилась не лише в Україні, а і в цілому в світі [131]. Зокрема, А. М. Гришин поділяє такі моделі на 4 групи: прогнозування швидкості поширення лісової пожежі, прогнозування контура пожежі, прогнозування перебігу і тепломасоперенесення в зоні й по фронту пожежі та загальні математичні моделі, які прогнозують все, що й кожна з попередніх. Він також вводить поняття трьох поколінь загальних математичних моделей [131]. Впливу кліматичних чинників на процеси розвитку і припинення крупних пожеж на відкритій місцевості присвячена робота [183].

У статті [149] здійснено огляд останніх моделей прокладання протипожежного бар'єру при локалізації ландшафтної (природної) пожежі за допомогою технічних засобів. Динамічна область пожежі обмежується лініями – контуром пожежі, допускаючи явне зображення в полярних координатах або параметричне завдання в разі складного невіпуклого контуру [149].

У праці [176] розроблено математичну модель процесу ліквідації лісової пожежі, яка враховує вибрані стратегії та прийняті тактики її ліквідації, а також наявність різноманітної лісової рослинності, існування малопрхідної та не прхідної місцевості, а також відсутність прямої видимості між пожежно-рятувальними підрозділами і обмежений огляд крайки вогню через задимленість [176].

Науковцями [114] отримано узгодження результатів розрахунків за моделлю А. М. Гришина із використанням годографа швидкості пожежі, особливо для фронтальної й тилової крайок пожежі. Автори декларують, що розбіжність для флангових крайок пожежі не перевищує 9%. При цьому час розрахунку кривій 1 не перевищує 1 хвилини, що є істотною перевагою запропонованої нами

моделі для оперативного прогнозування розвитку лісових пожеж. Таким чином, узгодження результатів розрахунків контуру вигорання відповідно до запропонованої моделі й моделі А. М. Гришина також підтверджує адекватність моделі авторів [114].

Науковцями [130] розроблена математична модель процесу нагрівання хвої внаслідок радіаційного теплового випромінювання з поверхні у формі прямокутника, яка дає можливість встановити час її нагрівання до температури самозаймання. В результаті математичного моделювання процесу нагрівання хвоїнки внаслідок контакту з нагрітим до високої температури тілом отримано залежності температури від часу та відстані до місця контакту, за якими можна встановити час та ширину ділянки хвої, нагрітої до температури самозаймання [130].

У роботі [131] встановлено, що на основі моделювання процесів поширення трав'яної пожежі на ділянках, вкритих пирієм повзучим, найбільша пожежна небезпека за швидкістю поширення фронту пожежі спостерігається за висоти трав 40 см та швидкості вітру 3 м/с, що понад в 5 разів перевищує цей показник порівняно з висотою трави 60 см та за відсутності вітру [131].

У роботі [148] авторами розглянуто фази поширення ландшафтної пожежі та виокремлено основні способи та технічні засоби для її локалізації та гасіння. Декларується, що в документах не обґрунтовано створення протипожежних бар'єрів під час здійснення заходів з локалізації та гасіння ландшафтних пожеж, а ширина бар'єру вказана лише під час проведення рубок дерев, розчищення та орання ґрунту та без урахування сили та інтенсивності поширення пожежі, тому доцільно дослідити значення ширини протипожежного бар'єру [148].

Науковцями в роботі [108] експериментально підтверджена доцільність застосування заряду з суміші вибухонебезпечних газів для створення протипожежного бар'єру. В порівнянні з шнуровим зарядом типу ЕШ-1П досягається зростання ширини протипожежного бар'єру за допомогою подвійного заряду (7-9) м та одинарного заряду (2-5) м при однаковій енергії вибуху заряду [108].

Науковцями [175] встановлено, що при моделюванні процесу перебігу лісової пожежі вибраний спосіб дискретизації лісової території має адекватно відображати її основні особливості та бути зручним для проведення розрахунків щодо його динаміки. Автори, базуючись на проведеному аналізі математичних моделей контурів лісової пожежі як найбільш адекватну нами вибрано нерегулярну сітку точок, характерними параметрами якої є рельєфні та лісорослинні особливості території в таких точках. Оскільки конфігурація крайки реальних лісових пожеж часто є достатньо складною, то для підвищеної точності розрахунків отримання під час моделювання достовірного відображення контура пожежі доцільно застосовувати різні методи його згладжування, наприклад, апроксимацією кривими другого та вищих порядків [175].

У дослідженні [68] проведено параметричний аналіз невизначеності на типовій моделі поширення вогню на схилі, що узгоджується з багатьма іншими моделями в рамках теорії теплопередачі та основних рівнянь підмоделей. Точне прогнозування поширення вогню та його поведінки в польових умовах дуже важливо для запобігання загибелі людей, покращення успіху початкового гасіння та кращого розуміння потенційної поведінки вогню, мінімізуючи багато ризиків для пожежників [40].

На основі фізичних даних багатофазова обчислювальна динаміка (CFD) модель виникнення та поширення лісової пожежі була розроблена та включена в багатоцільове програмне забезпечення CFD PHOENICS [49]. Моделювання Монте-Карло свідчить про те, що методологія може ідентифікувати території, де в майбутньому можуть виникнути пожежі [36].

Авторами [38] було протестовано декілька конфігурацій горимого шару: при довжині 2 м ширина горючого шару варіювалася від 25 см до 3,5 м, а навантаження горючого шару знаходилося в діапазоні від 0,1 до 1 кг/м². Експерименти були зосереджені на впливі ширини горючого шару та навантаження горючого шару на поширення вогню.

Результати [33] ставлять під сумнів припущення, що горючість живого листя хвойних дерев обмежується лише вмістом води. Дослідження пропонує

нову теорію та розширене уявлення про чинники, які домінують у займистості рослин і які згодом впливають на розвиток пожеж в природних екосистемах.

1.4. Технічні пристрої прогнозування та ліквідації лісових пожеж

Для підвищення ефективності функціонування систем з попередження та ліквідації надзвичайних ситуацій (мінімізації збитків від пожеж в природних екосистемах та на відкритих територіях, економії витрат на організацію моніторингу) необхідно здійснювати відеоінформаційні забезпечення з використанням бортових засобів повітряного моніторингу. Автори [109] декларують, що процес інформаційного забезпечення системи контролю пожеж в природних екосистемах та на відкритих територіях здійснюється основі засобів повітряного відеоспостереження [109].

Автором у роботі [124] розглянуто інформаційну систему раннього виявлення епіцентрів лісових пожеж, яка дає можливість: автоматизувати процес обробки аерофотозображень та відеопотоків даних, отриманих з бортів сучасних безпілотних літальних апаратів, що дають змогу створити мобільні автоматизовані робочі місця фахівців з можливістю миттєвого оповіщення про пожежну небезпеку (з доступом через внутрішні мережі та мережі загального користування); підвищити ефективність протипожежного моніторингу лісових насаджень шляхом використання сучасних безпілотних літальних апаратів, обробки та виведення інформації в on-line режимі; розширити інформаційно-функціональні можливості сучасних безпілотних літальних апаратів.

У відповідності до Порядку організації та застосування авіаційних сил та засобів для гасіння лісових пожеж визначено організацію для здійснення заходів з гасіння лісових пожеж із залученням пожежних літаків та гелікоптерів, підготовки екіпажів повітряних суден до гасіння лісових пожеж, питання взаємодії органів управління та підрозділів ДСНС під час ліквідації надзвичайних ситуацій, пов'язаних з гасінням лісових пожеж із залученням авіації. В роботі [143] запропоновано організаційну схему гасіння пожеж в природних екосистемах

із застосуванням авіації, розроблено тактику гасіння лісових пожеж із залученням авіаційної техніки. Надано пропозиції та рекомендації щодо посилення роботи по лісопожежній профілактиці, забезпечення своєчасного виявлення виникаючих лісових пожеж та їх ліквідацію на початковій стадії розвитку.

У роботі [115] запропоновано імовірнісну модель створення безперервного протипожежного бар'єру скидами води з пожежного літака з метою локалізації ландшафтної пожежі. Авторами наукової праці наведено три варіанти тактики локалізації [115].

У роботі [94] проведено дослідження сучасного стану інтегрованості інформаційних технологій у діяльність зі попередження виникнення та ліквідації пожеж в екосистемах. Виконано аналіз можливості залучення новітніх розробок із сфери робототехніки для допомоги рятувальникам при локалізації та ліквідації пожеж найвищого рівня складності в лісо-степових зонах України. Представником таких апаратів, проте розробленим спеціально для пожежної сфери є Thermite T3. Пристрій розроблений американською компанією Howe and Howe Technologies на замовлення департаменту пожежної охорони міста Маямі. Робот виготовлений із вогнетривких матеріалів та здатний переносити значні коливання температур. Це робить його ефективним при ліквідації пожеж із великим рівнем ризику для життя рятувальників. Здатність створювати високий тиск та подавати до 37 л/с води, що є ефективно при масштабних пожежах на відкритих територіях [94].

Науковці у роботі [137] зробили висновок, що наявне в підрозділах оперативно-рятувальної служби цивільного захисту пожежно-технічне обладнання для формування розпилених струменів має значні витрати, незручне для використання під час групового захисту, тому мало придатне для використання під час пожеж в екосистемах. Актуальним завданням є розробка пожежно-технічного обладнання для осадження аерозолів, пилу та зрошення поверхні, що може застосовуватись як для індивідуального, так і групового захисту, за витратою та площами зрошення пристосоване для гасіння пожеж в екосистемах [137].

У роботі [15] встановлено тактико-технічні характеристики спеціального пожежного ствола для гасіння підземних пожеж та розроблено спосіб їх гасіння вогнегасними речовинами з використанням поверхнево активних речовин. Авторами розроблений спеціальний пожежний ствол оснащений шнековими лопатями, які виконують цілий ряд функцій: розрізають тверді включення при заглибленні, ствола, утримують ствол у торф'яних шарах, відкривають вільні канали для виведення надлишків води на поверхню без розмивання ґрунту. Розроблений спеціальний пожежний ствол має більшу у понад 3 рази витрату вогнегасної речовини ніж існуючі на сьогодні аналоги, зокрема такі, як ТС-1, ТС-2, СПТ-70. Це дає змогу припустити, що на практиці таких стволів знадобиться менше, а ефективність гасіння їх буде вищою [15].

Використовуючи дані інтерв'ю з 46 старшими офіцерами місцевих пожежних підрозділів США, досліджено, як керівний персонал ставиться до ролі та відповідальності своїх відділів у зменшенні ризику пожеж. Загалом, наші висновки свідчать про те, що місцевий пожежний персонал часто виконує різноманітні завдання та ролі з пом'якшення наслідків, виступаючи інформаторами, вихователями, партнерами та планувальниками. Проблеми, з якими зіткнулися ці місцеві департаменти, також вказують на те, як фінансування, обмін інформацією та підтримка персоналу можуть краще сприяти залученню до роботи з пом'якшення наслідків і, зрештою, допомогти покращити безпеку лісових пожеж у громаді [37].

1.5. Висновки до Розділу 1

1. Щороку у світі виникає близько 400 тис. лісових пожеж, які призводять до пошкодження близько 0,5% загальної площі усіх лісів та викиду в атмосферу мільйони тон продуктів горіння. На території України 41,5 млн га (68,7% загальної площі) сільськогосподарських угідь, на яких ведуть свою діяльність 40,7 тис. підприємств, з яких 81,5 % – дрібні підприємства із площею угідь до 500 га. Наразі немає системи фінансування запобігання, виявлення та гасіння пожеж на

сільськогосподарських землях. Фактично пожежі на відкритих ландшафтах гасять підрозділи ДСНС України.

2. Навмисні підпали лучної рослинності призводять до виникнення значних пожеж в природних екосистемах, для гасіння яких залучається велика кількість сил і засобів пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС України. Вивчення впливу лучних пожеж на компоненти довкілля та організм людини є актуальною проблемою пожежної безпеки населених пунктів та лук.

3. Особливостям виникнення та поширення пожеж у природних екосистемах присвячено чимало наукових праць у світовому контексті, оскільки вони набувають різних рівнів надзвичайних ситуацій та різного характеру (природного → техногенного).

4. Найбільш вагомими чинниками впливу на виникнення та поширення пожеж у природних екосистемах (лучних пожеж) є кліматоп і мікрокліматоп, рельєф земної поверхні та фізико-хімічні властивості лісових горючих матеріалів чи порубкових решток, способи та методи гасіння.

5. Аналіз моделей виникнення та поширення пожеж у природних екосистемах (лучних пожеж) показав, що системність їхнього використання у всіх країнах, де вони виникають, практично, відсутня. У закордонних країнах та Україні зосереджені різноманітні наукові школи щодо моделювання ландшафтних та лучних пожеж.

РОЗДІЛ 2. ПРОГРАМА, ОБ'ЄКТИ, МЕТОДИ, ДОСЛІДЖУВАНІ ДІЛЯНКИ ТА ПРИРОДНО-КЛІМАТИЧНІ УМОВИ ПОШИРЕННЯ ЛУЧНИХ ПОЖЕЖ У РЕГІОНІ

2.1. Програма, об'єкти та методи досліджень

Дослідження впливу небезпечних чинників лучних пожеж зумовлено численними випадками підпалу сухої рослинності, стерні та порубкових решток. Такі випадки призводять до поширення вогню в часі та просторі, який нерідко перекидається на житлові і господарські будівлі і споруди; задимленості довкілля, де проживає населення; зміну фізико-хімічних властивостей ґрунтів у бік зниження родючості; загибелі фори, фауни, мікробіоценозу тощо. Лучні пожежі спричиняють значні затрати матеріальних ресурсів на їх гасіння, перш за все Державної служби України з надзвичайних ситуацій. В умовах одночасного виникнення лучних пожеж на декількох територіях процеси їх локалізації та ліквідації викликають труднощі (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 – Лучна пожежа поблизу м. Великі Мости Львівської області
11.08.2015 р. із залученням підрозділу ДСНС України

Дослідження впливу небезпечних чинників лучних пожеж на довкілля здійснювалися на території Українського Розточчя (Львівська область) поблизу с. Лавриків Львівського району.

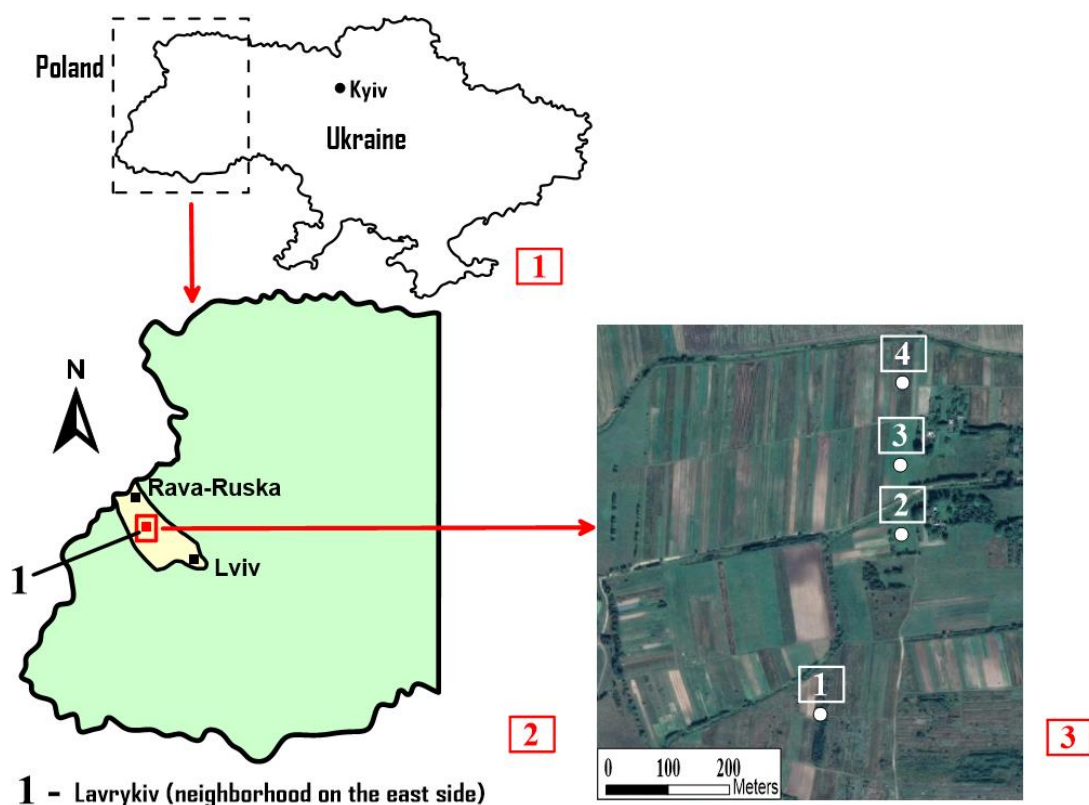


Рисунок 2.2 – Розташування досліджуваних ділянок на території Українського Розточчя (Львівська область)

Програмою досліджень впливу небезпечних чинників лучних пожеж на довкілля у відповідності до завдань передбачалося виконати наступне:

- встановити видовий склад трав'яної та дерево-чагарникової рослинності в межах досліджуваного регіону, а також видовий склад пірогенної сукцесії;
- дослідити вплив високих температур на фізико-хімічні показники едафтопів та відновлення ґрунтів за давністю виникнення лучної пожежі;
- дослідити вплив лучних пожеж на деревні породи, які притаманні досліджуваному регіону;
- встановити температури займання та самозаймання деревних порід у залежності від умов місцезростань;
- встановити основні температурні та вологісні режими модельного вогнища;
- встановити основні параметри променевого теплообміну модельного вогнища;
- здійснити моделювання лучної пожежі у середовищі WFDS;

- дослідити параметри протипожежних бар'єрів та зробити рекомендації щодо дальності їх встановлення від осередків горіння лучної рослинності;
- здійснити розрахунки сил і засобів для гасіння лучних пожеж.

Об'єкт дослідження – процеси, чинники розвитку, вплив на довкілля, локалізація та ліквідація лучних пожеж.

Предмет дослідження – вплив процесів спалювання сухої рослинності, стерні, порубкових решток на стан пожежної безпеки лучних екосистем та особливості влаштування протипожежних бар'єрів.

Методи дослідження: аналізу результатів наукових досліджень, які стосуються лучних пожеж та пожеж в природних екосистемах і пожежонебезпечних властивостей речовин і матеріалів; лабораторні методи визначення пожежонебезпечних властивостей горючих матеріалів, зокрема стандартні методи визначення температур займання, самозаймання; експериментальні методи дослідження лучних пожеж; методи визначення метеорологічних показників в польових умовах; методи статистичного, кластерного, регресійного аналізу та математичної обробки результатів досліджень; методи комп'ютерного моделювання процесів займання та поширення лучної пожежі; статистичні методи обробки отриманих результатів досліджень.

Відбір проб здійснювався під час пожежонебезпечного періоду в травні 2017 року поблизу Рава-Руського лісництва в селі Лавриків Жовківського району Львівської області (Україна). Температура повітря становила $+22^{\circ}\text{C}$, вітер – східний зі швидкістю 2,5 м/с. Угіддя – водонасичена рілля. Всього відібрано 12 проб ґрунтів із глибин 5 см, 10 см та 20 см. Ділянка 1 (проби 1, 2, 3) – молоді соснові насадження, пожежа виникла за 3,5 роки до початку проведення експерименту. Ділянка 2 (проби 4, 5, 6) – домінує лучна рослинність, яка повністю вигоріла за 2 роки до початку проведення експерименту. Ділянка 3 (проби 7, 8, 9) – домінує лучна рослинність, яка повністю вигоріла за 1,5 роки до початку проведення експерименту. Також було створено штучне модельне вогнище ландшафтної пожежі (низової, лісової) на відкритому просторі з дотриманням

усіх вимог Правил пожежної безпеки в лісах України [168] з метою фіксування температури та вологості ґрунту в зоні горіння, а також аналізу вмісту радіонуклідів у відібраних ґрунтових пробах із ділянок горіння (ділянка 4, проби 10, 11, 12). Вміст радіонуклідів визначався у «Лабораторії промислової токсикології» (м. Львів, Україна, свідоцтво № РЛ 086/17 від 26.06.2017 року про відповідність системи керування вимірюваннями вимогам ДСТУ ISO 10012:2015, протокол № 172/3 від 23.02.2018 р.). Метод дослідження – сцинтиляційний за допомогою спектрометра енергій гама-випромінювань з програмним забезпеченням обрахунку цифрових даних (середнє значення відносної похибки вимірювань при довірчій ймовірності 0,95 не перевищує 25%). Умови проведення випробувань: температура довкілля становила +19-21 °С, вологість повітря – 55-60%. Потужність еквівалентної дози фотонного іонізуючого випромінювання вимірювалася безпосередньо на кожній ділянці відбору проб на відстані 1,3 м від поверхні землі. Прилади досліджень: спектрометр енергій бета-випромінювань СЕБ-01-150 (свідоцтво про калібрування UA 01 № 751 від 23.03.2017 р.), спектрометр енергій гама-випромінювань СЕГ-001 «АКП-С» (свідоцтво про калібрування UA 01 № 751 від 23.03.2017 р.); екотестер довкілля «Soeks».

Комп'ютерне моделювання лучних пожеж здійснено з використанням програмного забезпечення Wildland-Urban Interface Fire Dynamics Simulator (далі WFDS).

Для проведення експериментальних досліджень використовували метрологічно-атестоване обладнання та повірені засоби вимірювання. Математичні і статистичні методи обробки результатів досліджень здійснювали із використанням програмного забезпечення Microsoft Office Excel, Mathcad, Surfer.

Водневий показник (рН) – визначався потенціометрично (рН-метр «рН-150И»); сухий залишок – випарюванням 50 мл проби у фарфоровій чашці (КНД 211.1.4.042-95); хлориди – титруванням нітратом срібла (за Ю. Ю. Лур'є, 1989); сульфати – гравіметрично після осадження нітратом барію (КНД 211.1.4.026-95); фосфати – фотометрично з молібденовим реактивом (МВВ 081/12-0005-1). Дослідження відібраних проб здійснено у Науково-дослідній лабораторії

екологічної безпеки Львівського державного університету безпеки життєдіяльності (Свідоцтво про відповідність системи керування вимірюваннями № РА091/21 від 30.11.2021 р., чинне до 29.11.2026 р., видане ДП "Львівстандартметрологія").

Проби ґрунтів були доставлені до «Лабораторії промислової токсикології» (м. Львів, Україна), де визначався у них вміст таких токсичних елементів як Cu, Cd, As, Ni, Co, Mn.

Прилади досліджень: ваги електронні «Pioneer PA 214C» (свідоцтво про калібрування КЛМ 774 від 26.10.2017 р.), комплект діагностичний з мікроскопом лабораторним «Мікмед-6», спектрофотометр атомно-абсорбційний С-115.М1 (завірений №01-2015.1, свідоцтво про калібрування UA/37/171129/001049 від 22.11.2017 р.), фотоелектрокалориметр КФК-3 (завірений №9004484, свідоцтво про калібрування КЛ770 від 24.10.2017 р.).

Визначення токсичних елементів здійснено за методами, які відображені у державних стандартах України: ДСТУ 4770.9, ДСТУ 4770.3, ДСТУ 4770.7, ДСТУ 4770.5, ДСТУ 4770.1, а також «Методичних вказівках з визначення миш'яку в ґрунтах фотометричним методом» від 26.02.1993 р. (за якою середнє значення відносної похибки вимірювання, при довірчій ймовірності 0,95 не перевищує 18%).

Для вимірювання температури полум'я використовувався автономний тепловізор «Fluke». Вологість ґрунтів визначалася за допомогою вологоміра «МГ-44». Кислотність ґрунтів визначалася за допомогою контактного приладу «КС-300В». Моделювання поширення кислотності вглиб генетичних горизонтів здійснено за допомогою демо-версії програми Surfer.

Визначення температури займання та температури самозаймання деревних порід проводили за ДСТУ 8829:2019 "Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їх визначення. Класифікація" проводили у сертифікованій Теплотехнічній лабораторії науково-дослідної лабораторії ЛДУБЖД.

2.1.1. Метод експериментального визначення температури займання твердих речовин і матеріалів

Для випробування готують 10-15 зразків досліджуваної речовини (матеріалу) масою $(3,0 \pm 0,1)$ гр. Зразки матеріалів повинні мати циліндричну форму діаметром (45 ± 1) мм. Плівкові і листові матеріали набирають у стопку діаметром (45 ± 1) мм, накладаючи шари один на одного до досягнення зазначеної маси. Якщо при температурі випробування зразок займається, то випробування припиняють. Якщо протягом 20 хв зразок не займається, або раніше цього часу цілком припиниться димовидалення, то випробування припиняють і в протоколі відзначають відмовлення.

За температуру займання приймають покази термоелектричного перетворювача, що вимірює температуру зразка. Методом послідовних наближень визначають мінімальну температуру зразка, при якій за час витримки в печі не більше 20 хв зразок займається і буде горіти більше 5 с після віддалення пальника, а при температурі на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ менше займання відсутнє.

За температуру займання досліджуваної речовини (матеріалу) приймають середнє арифметичне двох температур, що відрізняються не більше ніж на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, при одній з яких спостерігається займання 3 зразків, а при іншій – три відмовлення. Отримане значення температури округляють з точністю до $5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2.1.2. Метод експериментального визначення температури самозаймання твердих речовин і матеріалів

Метод реалізується в діапазоні температур від $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для випробування готують 10-15 зразків досліджуваної речовини (матеріалу) масою $(3,0 \pm 0,1)$ гр. Зразки матеріалів повинні мати циліндричну форму діаметром (45 ± 1) мм. Плівкові і листові матеріали набирають у стопку діаметром (45 ± 1) мм, накладаючи шари один на одного до досягнення зазначеної маси.

Методом послідовних наближень визначають мінімальну температуру робочої камери, при якій взірець самозаймається і горить більше 5 с, а при температурі на 10 °С менше – спостерігається відмова.

За температуру самозаймання досліджуваної речовини (матеріалу) приймають середнє арифметичне двох температур, що відрізняються не більше ніж на 10 °С, при одній з яких спостерігається самозаймання 3 зразків, а при іншій – три відмови. Отримане значення температури самозаймання округлюють з точністю до 5 °С.

2.1.3. Характеристика пожежної безпеки досліджуваних ділянок

Досліджувані ділянки розташовані на рівнинній території та у місцях, де проходили лучні пожежі, причиною яких був антропогенний чинник (вмисний підпал з метою знищення сухої рослинності) (рис. 2.3).



Ділянка 1



Ділянка 2



Ділянка 3



Ділянка 4

Рисунок 2.3 – Досліджувані ділянки впливу лісових пожеж на едафотоп

Ділянка 1 – молоді соснові насадження, пожежа, яка трапилася за 3,5 роки до початку експерименту, знищила всю лісову підстилку, підріст та спричинила

термічну деструкцію ґрунту, нижнім частинам стовбурів і гілкам *Pinus sylvestris* L., яка набула розвитку внаслідок штучного зарощування (2014 рік).

Ділянка 2 – домінує лучна рослинність, яка повністю вигоріла за 2 роки до початку проведення експерименту, пожежа спричинила термічну деструкцію ґрунту (2015 рік).

Ділянка 3 – домінує лучна рослинність, яка повністю вигоріла за 1,5 року до початку проведення експерименту, пожежа спричинила термічну деструкцію ґрунту (2016 рік).

Ділянка 4 – модельне вогнище внаслідок якого повністю вигоріла лучна рослинність, пожежа спричинила термічну деструкцію ґрунту (2017 рік) (рис. 2.2).

2.2. Кліматичні і температурні умови Українського Розточчя

Розточчя – звужене горбисте пасмо 15 – 20 км завширшки і до 400 м заввишки, яке простягається у напрямі зі Львова на південному-сході до Томашова, Щебрешина і Красніка (Польща) на північному-заході. Над прилеглими рівнинами – Надсянською низовиною на південному-заході і Надбужанською котловиною на північному-сході [166, 167, 168, 169].

Більш густою мережею рік характеризується Равське Розточчя, північно-східна та південно-східна частини Янівського Розточчя і східна частина Львівського Розточчя (рис. 2.4).

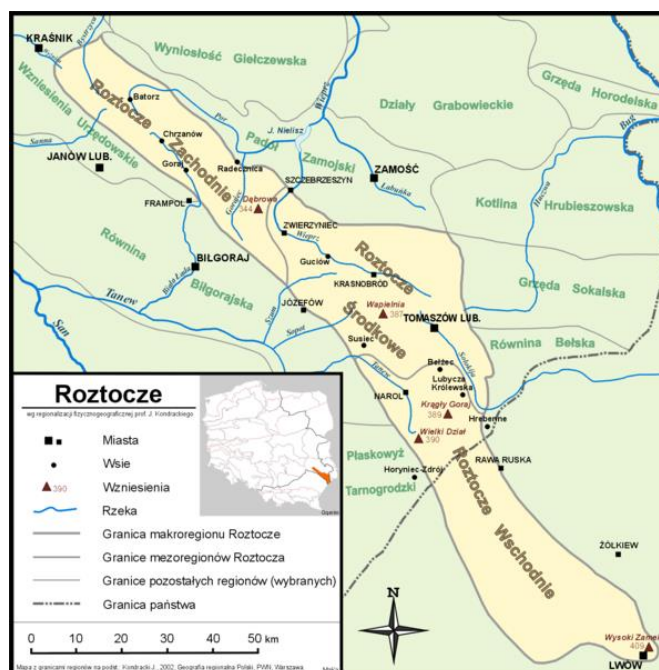


Рисунок 2.4 – Карта Розточчя (отримана із відкритих джерел)

Клімат Львівського Розточчя відзначається різноманітністю мезокліматів, що зумовлюється неоднорідністю його поверхні і характеризується м'якістю, яка проявляється невеликою різницею температур літа і зими, та високою зволоженістю, про яку свідчать значні річні суми опадів. Регіону не властиві сильні морози чи посухи зате характерні часті відлиги взимку, значна хмарність, обложні дощі та викликані ними літньо-осінні паводки. Радіаційний і тепловий режим зумовлений перерозподілом території регіону тепла та вологи, і характером місцевості (висота, експозиція схилів, ґрунтово-рослинний покрив) [134]. Територія Львова, за розрахунками М.С. Андріанова, одержує в рік до 163,3 ккал/см² сумарної радіації (табл. 2.1, 2.2).

Таблиця 2.1 – Розрахункові місячні показники сонячної радіації (Адріанов, 1951)

Місяці	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Сонячна радіація, Ккал/см ²	4,7	7,5	13,5	17,8	22,1	23,0	22,5	18,8	14,1	9,6	5,8	3,8

Таблиця 2.2 – Дійсна величина сумарної сонячної радіації

Місяці	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Сонячна радіація, Ккал/см ²	2,4	3,5	5,6	7,9	12,8	13,4	16,6	12,2	8,7	5,4	1,8	1,1

Теплові ресурси виражаються тепловим балансом, до якого, крім радіаційного балансу, належить кількість тепла, що витрачається на випаровування, на турбулентний теплообмін між поверхнею Землі й атмосферою та на теплообмін у ґрунті [95, 98]. На території міста, яка в поперечнику (схід-захід) сягає близько 15 км, внаслідок значної площі мертвої підстилаючої поверхні спостерігається (особливо в літні місяці) перевищення природного теплового балансу над природним [135].

Клімат району відноситься до перехідного від атлантичного вологого до континентального типу, в загальному він більш вологий, аніж клімат Малополицької низовини. Кількість опадів досягає 650-700 мм/рік. Середня річна температура повітря дорівнює +7,4°C, середня температура січня у Львові – +4,1°C, Бережанах - +5°C, а середня температура липня відповідно +18,3 – +18,1 °C Нерідкі пізні весняні заморозки, особливо шкідливі на долинах Розточчя, де бувають навіть у червні, пошкоджуючи дуб, горіх і багато інших порід. Вітри переважають західні, в окремі роки викликають відносні буреломи і вітровали. З несприятливих погодних явищ в цьому районі варто відмітити сніголоми, які особливо часто пошкоджують чисті соснові культури, створені в судібровних типах лісу. Вегетаційний період триває в середньому 210 днів. Район густо заселений (більше 100 жителів на 1 км²), населення головним чином зайняте в сільському господарстві. На території району розташований великий промисловий і науковий центр – м. Львів та ряд невеликих міст, такі, наприклад, як Бібрка, Золочів, Ходорів, Рогатин, Бережани; промисловість в маленьких містах розвинена відносно слабо. Майже всі великі лісові масиви мають добре

розвинену мережу покращених ґрунтових та шосейних доріг. Середня забезпеченість транспортними шляхами – 12 км на 1 тис. площі лісового фонду.

Вітровий режим характеризується слабкими та помірними вітрами, швидкість яких становить 0–5 м/с (70–90 % за рік). Вітер зі швидкістю 0–1 м/с найчастіше повторюється влітку, зі швидкістю 2–3 м/с однаково протягом року, а зі швидкістю 6–10 м/с – взимку. У холодну пору бувають вітри зі швидкістю 6–10 м/с. Швидкості більші, ніж 10 м/с, спостерігаються в області рідко [95].

Найхолоднішим місяцем зими в області є січень, середньомісячна температура якого на 2–3 °С нижча, ніж у грудні. Для усіх зимових місяців характерна велика мінливість температури повітря. Середньорічні температури повітря коливається в межах +5,2–+8,0 °С. Амплітуда річних коливань – від +20,7 до +23 °С [171].

2.3. Видовий склад рослинності Українського Розточчя

На Розточчі переважну площу займають соснові (42%), дубові (23%) та букові (15%) ліси, зазвичай змішані з домішкою різних листвяних порід. З хвойних порід природнього походження, окрім сосни звичайної, ще є острівні ділянки ялини європейської та ялиці білої. В лісові культури все ширше вводиться модрина, псевдотсуга тисолиста, сосна веймутова та інші високопродуктивні породи.

В поширенні природної деревної рослинності помітні деякі закономірності, а саме: сосново-букові та букові насадження розташовані як правило, на піднесених елементах рельєфу, в містах виходу на поверхню вапняків; у підніжжя схилів, по долинах проростають переважно дубові, сосново-дубові насадження або похідні від них. Корінні сосново-букові і чисто букові насадження характеризуються високою продуктивністю та якістю деревини. Чисті соснові культури, хоч і володіють високою продуктивністю, відрізняються досить

низькою стійкістю до сніголомів, які в окремі роки викликають дуже сильні пошкодження [136] (табл. 2.3).

Таблиця 2.3 – Розподіл площі лісового фонду за типами лісорослинних умов

Тип лісорослинних умов	Всього	У тому числі за ступенем вологості				
		сухі	свіжі	вологі	сирі	мокрі
Розточчя						
Бір	0,7	-	0,4	0,3	-	-
Субір	7,0	-	4,4	1,8	0,8	-
Сугруди	65,9	-	54,1	9,9	1,9	-
Груди	26,4	-	23,3	3,1	-	-
Всього:	100,0	-	82,2	15,1	2,7	-

Лісокультурні заходи, які входять в загальну систему, мають передбачати відношення висаджених деревних порід конкретним типам лісу. Оскільки в районі переважають родючі ґрунти, наявні сприятливі кліматичні умови, створювані насадження мають бути змішаними, ні в якому разі неприпустимо утворення чистих соснових, ялинових чи дубових насаджень, які часто вражаються хворобами та шкідниками, пошкоджуються при вітровалах, буреломах та пожежах, що призводить до їх передчасної загибелі. Чисті насадження можна утворювати тільки з бука в свіжих та вологих бучинах та з вільхи чорної – в мокрих грудах [136].

У межах Львівського Розточчя виділяють п'ять угруповань рослинності: лісову, лучну, болотну, скельну і степову. Найбільше представлені перші три групи.

Найпоширеніші типи лісу і типи вирубок представлені в табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Типи лісу і типи вирубок на Львівському Розточчі (за Жижиним)

Типи лісу	Типи вирубок
Сосняк лишайниковий	Куничниковий

Сосняк сфагновий	—
Грабово-дубово-соснові (свіжі)	Куничниковий
Грабово-дубово-соснові (вологі)	Ожинові
Грабово-дубово-соснові (сирі)	Моховий
Грабово-дубові (свіжі)	Ліщиново-знітові
Грабово-букові (вологі)	Ситниковий
Грабово-букові (свіжі)	Знітові

В залежності від ґрунтово-кліматичних умов та рельєфу, в цьому лісогосподарському районі формуються різні типи лісорослинних умов та типів лісу. В Опіллі панують груди з незначною сумішшю сугрудків, в Розточчі переважають сугрудки і меншою кількістю представлені дібровами і суборами.

2.4. Пірогенна сукцесія досліджуваної лучної рослинності

Влітку 2017 року, провівши експеримент щодо горіння лучної рослинності та вимірювання показників температури полум'я, температури ґрунту, вологості, рН на різній глибині, нами досліджувана ділянка у подальшому не використовувалася, а стала майданчиком для вивчення постпірогенної сукцесії у подальші роки. За В. П. Кучерявим (2003) пірогенні сукцесії зумовлені пожежами, що можуть статися в лісах, степах, на болотах тощо.

На експериментальній ділянці впродовж наступних трьох років спостерігалася поява 12 видів, які були віднесені до 10 родів (табл. 2.5).

Таблиця 2.5 – Біологічна класифікація постпірогенної сукцесії лучної рослинності
Українського Розточчя

Вид		Рід		Родина	
Українська назва	Латинська назва	Українськ а назва	Латинська назва	Українська назва	Латинська назва
Королиця звичайна	<i>Leucanthemum vulgare</i> Lam.	Королиця	<i>Leucanthemum</i>	Айстрові	<i>Asteraceae</i>
Пирій повзучий	<i>Elymus repens</i> (L.)	Пирійник	<i>Elymus</i>	Злакові	<i>Poaceae</i>
Курячі очка польові	<i>Anagallis arvensis</i> L.	Курячі очка	<i>Anagallis</i>	Первоцвітові	<i>Primulaceae</i>
Жовтий осот городній	<i>Sonchus oleraceus</i> L.	Жовтий осот	<i>Sonchus</i>	Айстрові	<i>Asteraceae</i>
Підмаренник сланкий	<i>Galium humifusum</i> M.Bieb.	Підмаренник	<i>Galium</i>	Маренові	<i>Rubiaceae</i>
Злинка однорічна (син. Стенактис однорічний)	<i>Erigeron annuus</i> (L.) Pers.	Злинка	<i>Erigeron</i>	Айстрові	<i>Asteraceae</i>
Злинка гостра	<i>Erigeron acris</i> L.	Злинка	<i>Erigeron</i>	Айстрові	<i>Asteraceae</i>
Підмаренник запашний	<i>Galium odoratum</i> (L.) Scop.	Підмаренник	<i>Galium</i>	Маренові	<i>Rubiaceae</i>
Морква звичайна	<i>Daucus carota</i> L.	Морква	<i>Daucus</i>	Окружкові	<i>Apiaceae</i>
Деревій звичайний	<i>Achillea millefolium</i> L.	Деревій	<i>Achillea</i>	Айстрові	<i>Asteraceae</i>
Стокротки багаторічні	<i>Bellis perennis</i> L.	Стокротки	<i>Bellis</i>	Айстрові	<i>Asteraceae</i>
Кульбаба лікарська	<i>Taraxacum officinale</i> (L.) Weber ex F.H. Wigg.	Кульбаба	<i>Taraxacum</i>	Айстрові	<i>Asteraceae</i>

Зазначимо, що видовий склад постпірогенної сукцесії збіднений, а на території самого згарища спостерігається розсіяність рослин та спонтанне

розташування на досліджуваній ділянці. Рясність видів пірогенної сукцесії опишемо за двома шкалами – Друде (1890) та Браун-Бланке (1951) (табл. 2.6).

Таблиця 2.6 – Рясність видів постпірогенної сукцесії лучної рослинності
Українського Розточчя

Вид	Шкала Друде	Шкала Браун-Бланке
Королиця звичайна <i>Leucanthemum vulgare</i> Lam.	<i>Sp</i>	1
Пирій повзучий <i>Elymus repens</i> (L.)	<i>Cop₁</i>	2
Курячі очка польові <i>Anagallis arvensis</i> L.	<i>Sp</i>	1
Жовтий осот городній <i>Sonchus oleraceus</i> L.	<i>Sp</i>	1
Підмаренник сланкий <i>Galium humifusum</i> M.Bieb.	<i>Sp</i>	1
Злинка однорічна (син. Стенактис однорічний) <i>Erigeron annuus</i> (L.) Pers.	<i>Sol</i>	+
Злинка гостра <i>Erigeron acris</i> L.	<i>Sol</i>	+
Підмаренник запашний <i>Galium odoratum</i> (L.) Scop.	<i>Sp</i>	1
Морква звичайна <i>Daucus carota</i> L.	<i>Sol</i>	+
Деревій звичайний <i>Achillea millefolium</i> L.	<i>Sol</i>	+
Стокротки багаторічні <i>Bellis perennis</i> L.	<i>Cop₁</i>	2
Кульбаба лікарська <i>Taraxacum officinale</i> (L.) Weber ex F.H. Wigg.	<i>Cop₁</i>	2

Роди *Galium*, *Erigeron* були представлені 2 видами, що становило частку по 17%, решта родів – 8% (рис. 2.5).

Зазначимо, що переважаючі роди: *Galium* – це однорічні або багаторічні трави, іноді злегка кущисті біля основи, з прямовисними, лежачими або виткими 4-кутовими стеблами, від голих до жорстко запушених, а іноді з дрібними колючками; *Erigeron* – рід одно- і багаторічних гіллястих рослин з родини айстрових [177].

Постпірогенна сукцесія на досліджуваних ділянках представлена всього 5 родинами. Щодо класифікації родин, то найбільшим представником є *Asteraceae* – 7 видів (59%) та *Rubiaceae* – 2 види (17%). Решта – *Poaceae*, *Primulaceae*, *Apiaceae* – по 1 виду (8%) (рис. 2.6).

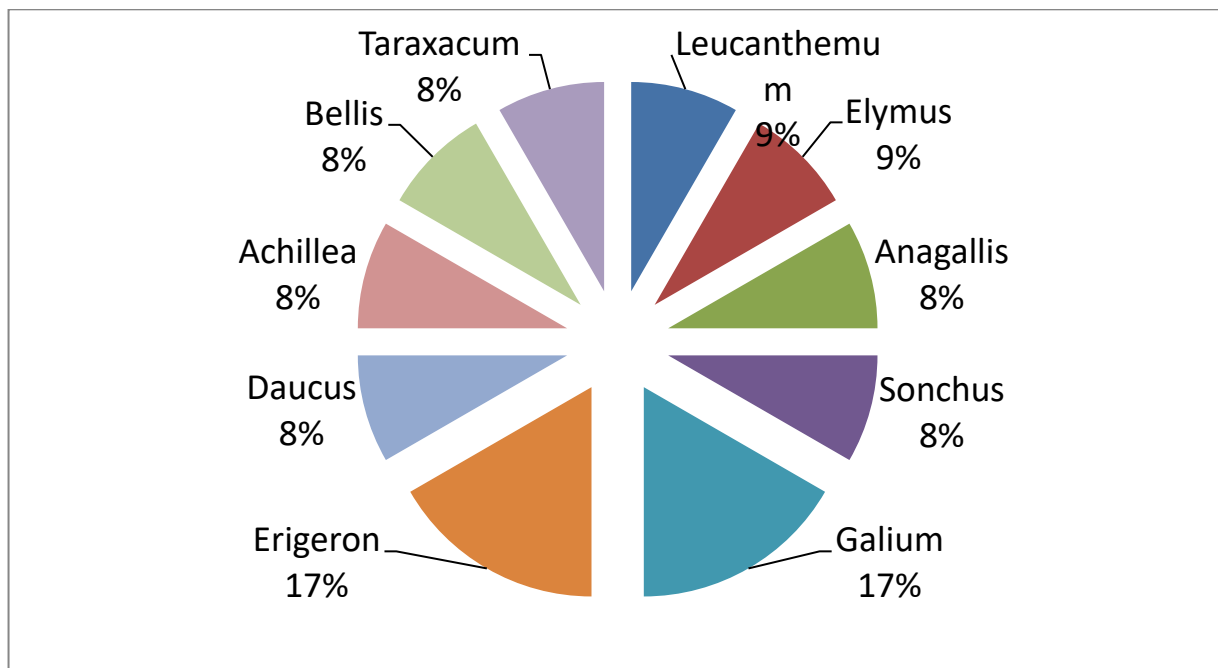


Рисунок 2.5 – Класифікація постпірогенної сукцесії Українського Розточчя (%) за родами

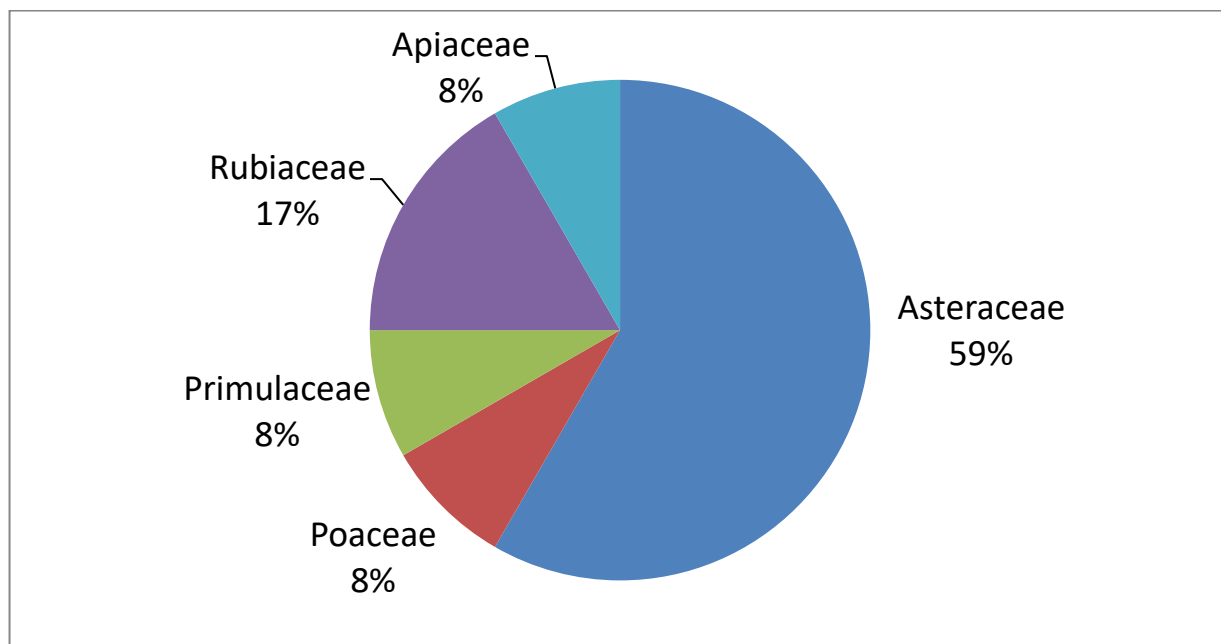


Рисунок 2.6 – Класифікація постпірогенної сукцесії Українського Розточчя (%) за родинами

Переважання *Asteraceae* у сукцесії є доволі позитивним явищем, адже вони є найпоширенішою родиною флори України та мають велике практичне застосування і використовуються як лікарські, харчові, кормові, медоносні, олійні, декоративні види. Окремі представники родини *Asteraceae* можуть бути небезпечними чи то отруйними (геленіум, жовтозілля, *Ageratina altissima*) для людини. Найбільш відома амброзія, точніше її пилок, який, потрапляючи у дихальні шляхи людини, спричиняє алергію. Родина *Asteraceae* характеризується нижчою горючістю, аніж *Poaceae*, яка в пірогенній сукцесії представлена одним видом.

2.5. Вплив щільності населення на виникнення пожеж у природних екосистемах

Пожежі в природних екосистемах спричинені ландшафто-трансформуючими чинниками, складовою яких є пило-газове забруднення атмосфери, знищення лісових масивів та живих організмів, забруднення екосистем небезпечними токсичними сполуками та важкими металами.

Внаслідок локалізації та ліквідації великих і особливо великих лісових пожеж, пожеж у природних екосистемах залучається значна кількість особового складу та техніки. Знищуються практично усі компоненти довкілля – флора, фауна, ґрунти, забруднюються річки, водойми, повітря. Пожежі у природних екосистемах спричиняють потрапляння в атмосферу значної кількості летких продуктів горіння та небезпечних речовин і сполук.

Кількість пожеж у природних екосистемах та лісових пожеж залежить від щільності населення:

$$Z = 1,3x + 30, \quad (2.1)$$

де Z - кількість пожеж, шт. на 1 млн. га на рік;

x – щільність населення, чол. на 1 км².

Науковцем встановлено, що із зменшенням щільності населення знижується кількість лісових пожеж. Зі збільшенням щільності населення кількість пожеж, що припадають на одиницю площі лісового фонду, закономірно зростає, але в одну людину - знижується. Подальші дослідження показали, що ця залежність більш точно виражається так: $Z = \sqrt{x}$. Зі зменшенням щільності населення зростає і частка жителів, які не пов'язані із лісом у своїй виробничій діяльності та відвідують ліс лише у вільний час. Середній мешканець рідконаселеної території, частіше буваючи в лісі, наражається на більший ризик допустити необережне поводження з вогнем і викликати пожежу, ніж мешканець щільно населеної території (рис. 2.7).

Таблиця 2.7 – Щільність населення в областях у межах Західного Лісостепу України

Область	Щільність населення, чол./км ²
Львівська	114,4 (2021 р.) [93]
Волинська	51,7 (2017 р.) [94]
Тернопільська	82,8 (2010 р.) [95]
Хмельницька	61 (2021 р.) [96]
Івано-Франківська	98,9 (2018 р.) [97]
Чернівецька	112,2 (2016 р.) [98]

Враховуючи щільність населення в областях у межах Західного Лісостепу України було розраховано за залежністю (2.1) ймовірну кількість пожеж у природних екосистемах у межах Західного Лісостепу України. Площа областей України отримана із довідника [178].

Отримані дані наведені на рис. 2.7.

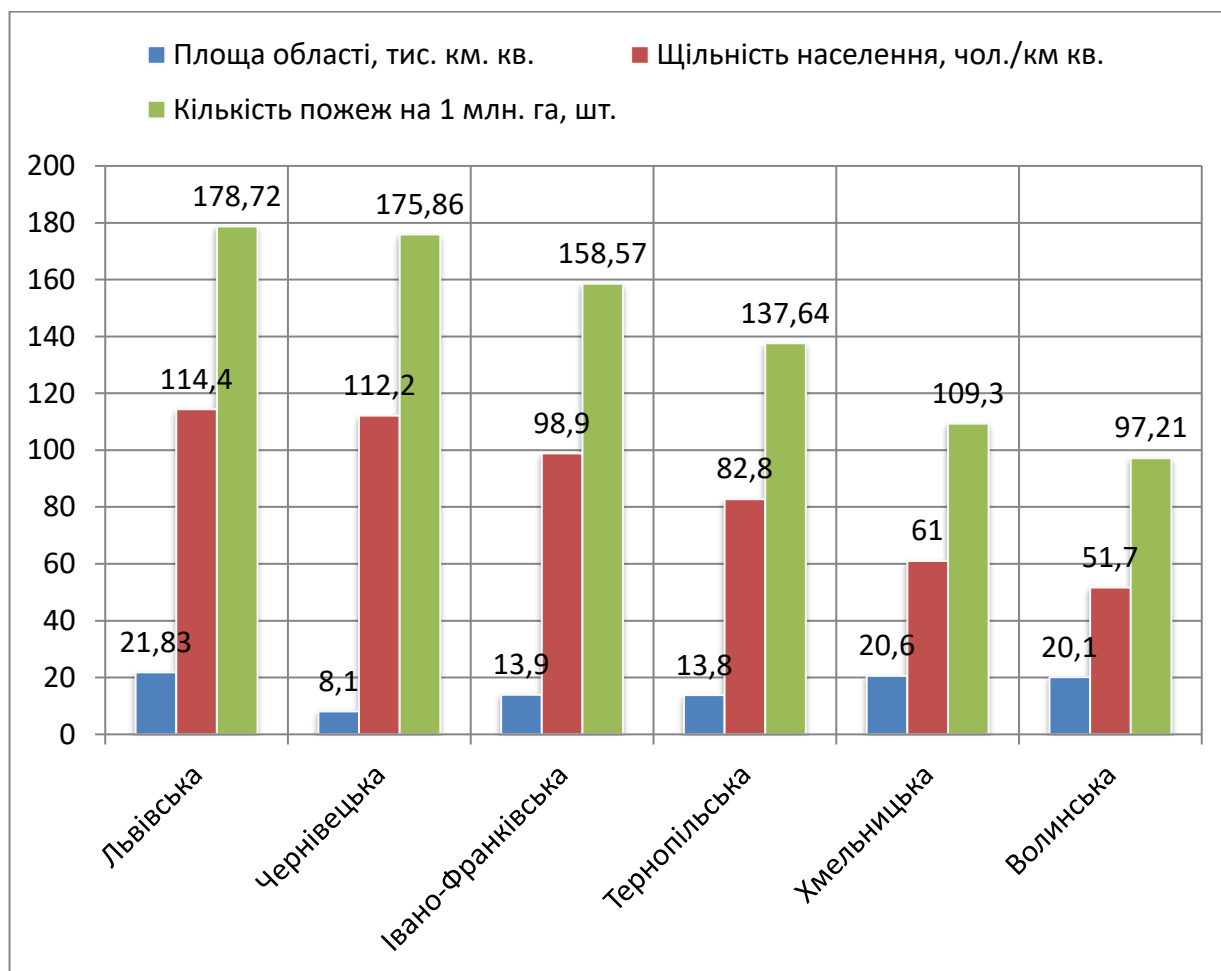


Рисунок 2.7 – Ймовірність виникнення пожеж у природних екосистемах у межах Західного Лісостепу України

Розрахунково встановлено, що ймовірне виникнення найбільшої кількості пожеж у природних екосистемах в межах західних областей України (Західного Лісостепу) характерне для Львівської (178,72 пожеж на 1 млн. га), Чернівецької (175,86 пожеж на 1 млн. га), Івано-Франківської (158,57 пожеж на 1 млн. га) областей, усереднені показники притаманні Тернопільській області – 137,64 пожежі на 1 млн. га, а найменша кількість для Хмельницької (109,8 пожеж на 1 млн. га) та Волинської областей (97,21 пожеж на 1 млн. га).

2.6. Висновки до Розділу 2

1. В Українському Розточчі переважну площу займають соснові (42%), дубові (23%) та букові (15%) ліси, зазвичай змішані з домішкою різних листвяних порід.

З хвойних порід природнього походження, окрім сосни звичайної, ще є острівні ділянки ялини європейської та ялиці білої. В лісові культури все ширше вводиться модрина, псевдотсуга тисолиста, сосна веймутова та інші високопродуктивні породи. Хвойні породи в насадженнях збільшують ризик виникнення та поширення пожеж у природних екосистемах.

2. Досліджувані ділянки розташовані в межах Українського Розточчя на рівнинній території та у місцях, де проходили лучні пожежі, причиною яких був антропогенний чинник (вмисний підпал з метою знищення сухої рослинності).

3. Переважання *Asteraceae* у пірогенній сукцесії є доволі позитивним явищем, адже вони є найпоширенішою родиною флори України та мають велике практичне застосування і використовуються як лікарські, харчові, кормові, медоносні, олійні, декоративні види. Окремі представники родини *Asteraceae* можуть бути небезпечними чи то отруйними (геленіум, жовтозілля, *Ageratina altissima*) для людини. Родина *Asteraceae* характеризується нижчою горючістю, аніж *Poaceae*, яка в пірогенній сукцесії представлена одним видом.

4. Розрахунково встановлено, що ймовірне виникнення найбільшої кількості пожеж у природних екосистемах в межах західних областей України (Західного Лісостепу) характерне для Львівської (178,72 пожеж на 1 млн. га).

5. Необхідно посилити протипожежну безпеку лісових насаджень, здійснити ряд профілактичних заходів з попередження пошкодження та загоряння лісів, степів, полів із злаковими культурами та лук.

РОЗДІЛ 3. НЕБЕЗПЕЧНІ ЧИННИКИ ЛУЧНИХ ПОЖЕЖ ТА ЇХ ВПЛИВ НА БІОТУ

3.1. Променевий теплообмін під час лучних пожеж

Променевий теплообмін характеризується процесом перетворення тепла у енергію електромагнітних хвиль, які розповсюджуються зі швидкістю 300 тис. км/с у розрідженні. Здатністю поглинатися тілами та перетворюватися у теплову енергію володіють світлові та інфрачервоні промені, які мають довжину хвилі відповідно 0,4-0,78 мкм та 0,78-1000 мкм. Світлові (видимі) і інфрачервоні (теплові) промені довжиною хвиль 0,4-40 мкм нагрівають тіла, які вони опромінюють. Тобто такого роду промені представляють серйозну пожежну небезпеку. Променевий теплообмін супроводжується подвійним перетворенням енергії: нагріте тіло віддає частину свого тепла у вигляді променів (перетворення теплової енергії у енергію електромагнітних хвиль). Промені, зустрівши на своєму шляху перешкоди (тобто інше тіло), віддають частину своєї енергії, яка знову перетворюється в тепло (перетворення поглинутої енергії електромагнітних хвиль у енергію коливання його молекул чи рух його електронів). При променевому теплообміні частина променевої енергії, яка падає на тіло, відбивається у довкілля чи проходить наскрізь тіла. Променевий теплообмін описують низка фізичних законів – Планка, Віна, Стефана-Больцмана, Кірхгофа, Ламберта [83].

Для променевого теплообміну у випадку лучних пожеж розглянемо закон зміщення Віна. Вільгельм Він вперше вивів цей закон в 1893 році шляхом застосування законів термодинаміки до електромагнітного випромінювання. Закон стверджує, що максимум інтенсивності випромінювання відповідає такому значенню довжини хвилі:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}, \quad (3.1)$$

де, b – стала Віна ($2,8978 \cdot 10^{-3}$, м·К);

T – температура полум'я, К.

Під час контрольованого підпалу лучної рослинності спостерігалось, що температура полум'я в початковий момент часу досягла значення $+66,7^{\circ}\text{C}$ (рис. 2). Надалі у процесі горіння, через 20 секунд, температура полум'я сягнула $+352,5^{\circ}\text{C}$. Максимальною температура полум'я була $+715,7^{\circ}\text{C}$ після вигорання всього горючого матеріалу через 2,5 хв після початку дослідів (рис. 3.1).

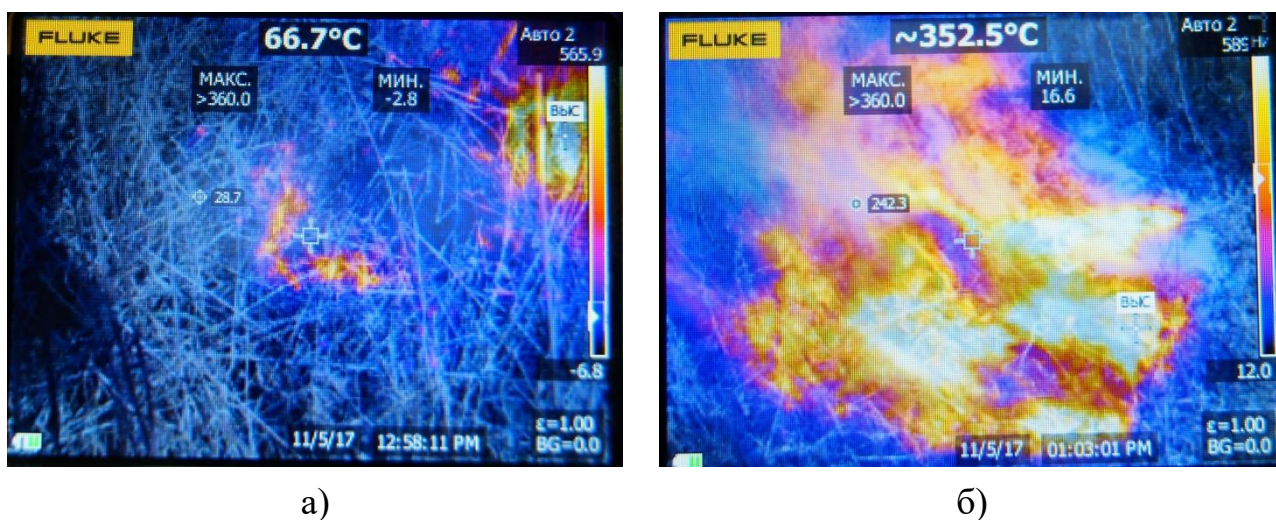


Рисунок 3.1 – Моніторинг модельного вогнища: а) в початковий момент часу;
б) під час проходження фронту пожежі

Вимірявши температури полум'я у різних ділянках модельного вогнища при горінні лучної рослинності, отримано дані, які наведені на рис. 3.2 і таблиці 3.1.

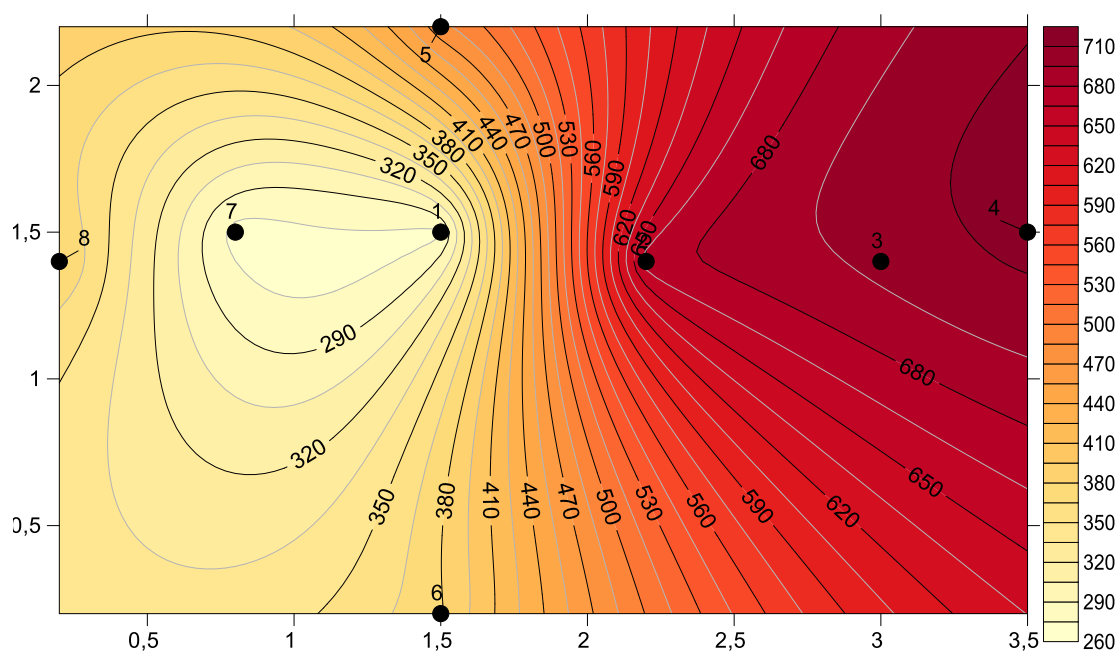


Рисунок 3.2 – Температура полум'я в дослідних ділянках, °С

Таблиця 3.1 – Температури полум'я в різних ділянках модельного вогнища

Дослідна ділянка	Температура полум'я, °С	Температура полум'я, К
1	272,2	545,2
2	673,6	946,6
3	698,7	971,7
4	715,7	988,7
5	480,6	753,6
6	378,6	651,6
7	269,3	542,3
8	381,3	654,3

Використавши формулу (3.1) отримано довжини хвиль променевого теплообміну під час горіння лучної рослинності на відкритому просторі. Результати довжини хвиль наведено на рис. 3.3.

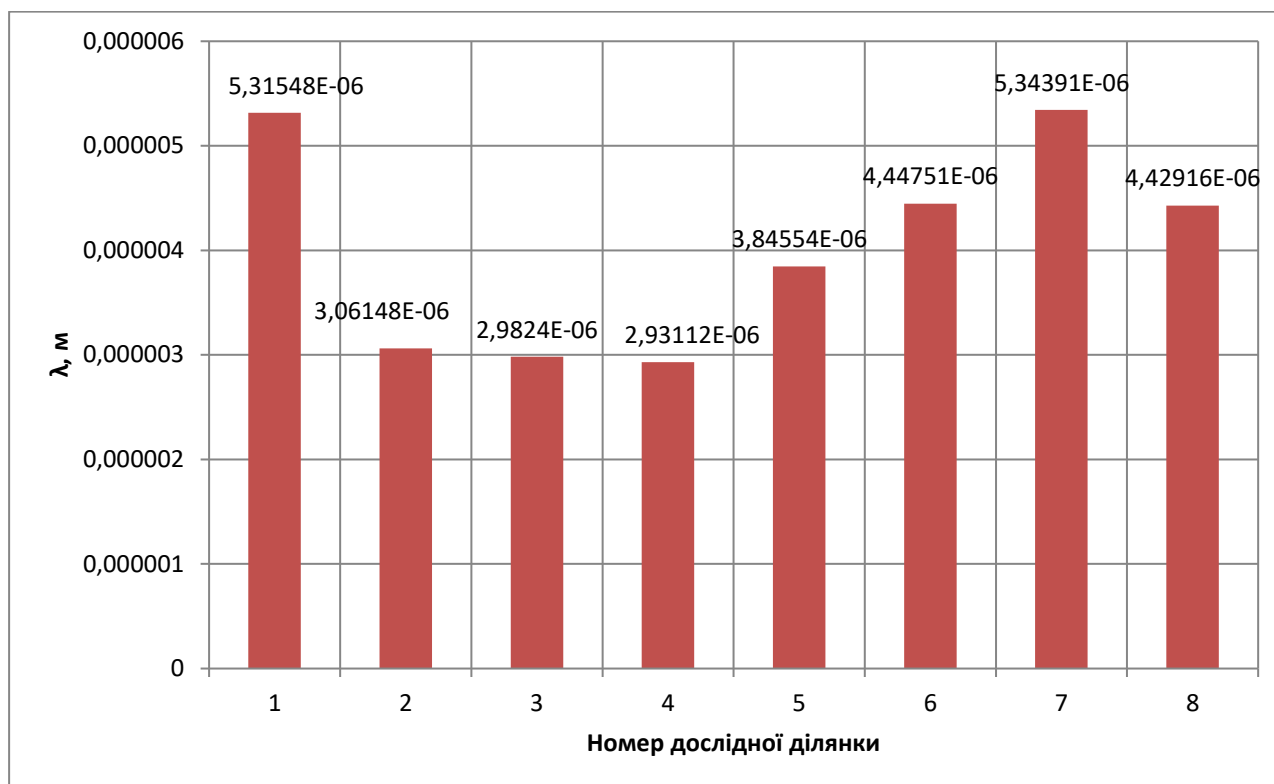


Рисунок 3.3 – Довжина хвиль променевого теплообміну під час горіння лучної рослинності на відкритому просторі

Таким чином, довжина хвиль променевого теплообміну під час горіння лучної рослинності на відкритому просторі знаходиться в діапазоні 2,9 - 5,3 мкм, що відповідає інфрачервоному (тепловому випромінюванню).

Моніторинг температури субстрату під час лучних пожеж з точки зору післяпожежного фітомеліоративного відновлення порушених територій є важливими. Фізико-хімічні властивості мінералізованого шару, який зазнав температурного впливу лучних пожеж, змінюються з точки зору зниження врожайності та згоряння поживних речовин.

Ландшафтні пожежі спричиняють значне техногенне навантаження на всі компоненти біосфери. Під час проведення досліджень встановлено, що температура полум'я під час горіння лучної рослинності в початковий момент часу становила +66,7°C. У процесі горіння, через 20 секунд, температура полум'я сягнула +352,5°C, максимальною температура полум'я була +715,7 °C після вигорання всього горючого матеріалу (через 2,5 хв після початку дослідів).

Потужність еквівалентної дози фотонного іонізуючого випромінювання на місці проведення експерименту становила 0,11 мкЗв/год. та не перевищувала гранично-допустимі концентрації (0,3 мкЗв/год.).

Отримані результати досліджень у подальшому можуть стати основою для проведення аналізу впливу низових лісових пожеж на міграцію важких металів, вигорання мінеральних речовин у едафічних горизонтах, впливу пірогенного чинника на фітомеліоративне відновлення територій, а також створення протипожежних розривів для профілактики лісових пожеж у межах досліджуваного регіону.

3.2. Випромінювальна здатність горючого матеріалу та густина теплового потоку під час лучних пожеж

Випромінювальна здатність об'єктів, які горять має важливе значення для проектування пожежно-профілактичних заходів у системі оперативно-рятувальної служби ДСНС України. Особливе значення вимірювання випромінювальної здатності мають пожежі у природних екосистемах, лісові пожежі та лучні пожежі. Численні вимірювання температури полум'я сухої рослинності, температур і вологості ґрунтів пірогенного походження на різній глибині спонукають розрахувати основні температурні характеристики такого роду пожеж.

Залежність між випромінювальною здатністю і температурою випромінюваного абсолютно чорного тіла описує закон Стефана-Больцмана, який виражається таким рівнянням:

$$E_0 = \sigma_0 T^4 = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad (3.2)$$

де, E_0 – випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла (кількість енергії, яку випромінює абсолютно чорне тіло із 1 м² за 1 год.), Вт/м²;

σ_0 – константа випромінювання абсолютно чорного тіла ($5,77 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴));

T – температура тіла, яке випромінює тепло, К;

C_0 – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла (5,77 Вт/(м²·К⁴)).

Закон Стефана-Больцмана застосовується і до реальних (так званих до сірих тіл), але формула набуває такого вигляду:

$$E = C \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad (3.3)$$

де, E – випромінювальна здатність абсолютно сірого тіла, Вт/м²;

C – коефіцієнт випромінювання сірого тіла, Вт/(м²·К⁴).

Розглянувши формули (1.1) та (1.2) розрахуємо відношення:

$$\frac{E}{E_0} = C \left(\frac{T}{100} \right)^4 / \left[C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 \right] = \frac{C}{C_0} = \varepsilon, \quad (3.4)$$

де, ε – відносна поглинальна здатність, або ступінь чорноти тіла (приймається від 0 до 1 (табличне значення)).

Таким чином, формулу (1.2) можна записати як:

$$E = \varepsilon C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4. \quad (3.5)$$

Променевий теплообмін (теплове випромінювання) із точки зору пожежної безпеки у природних екосистемах (лучних пожеж) є актуальним питанням, яке досконало не вирішене, оскільки теплове випромінювання від сильно нагрітих об'єктів (осередків горіння сухої рослинності) може спричинити займання навколишніх предметів. Практичні приклади та аналіз наукових джерел дає змогу стверджувати, що із-за цієї причини лучні пожежі та пожежі у природних екосистемах розвиваються у просторі та часі.

Густина теплового потоку виражається як:

$$q_{1,2} = C_{np} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (3.6)$$

де, C_{np} – приведений коефіцієнт випромінювання сірого тіла, Вт/(м²·К⁴).

Приведений коефіцієнт випромінювання сірого тіла розраховується за формулою:

$$C_{np} = \varepsilon_{np} C_0, \quad (3.7)$$

де, ε_{np} – приведена відносна поглинальна здатність, або ступінь чорноти тіла (приймається від 0 до 1 (табличне значення)).

Використовуючи рівняння (1.5) можна вирішити завдання пожежної безпеки, яке стосується займання горючих матеріалів, які розташовані поблизу джерела горіння. Із цією метою в рівняння густини теплового потоку замість значення T_2 підставляють значення $T_{дон}$ для досліджуваного матеріалу (у нашому випадку для сухої лучної та дерево-чагарникової рослинності). Розраховану густину теплового потоку порівнюють із критичною густиною теплового потоку для досліджуваного матеріалу $q_{кр}$ (у нашому випадку для сухої лучної та дерево-чагарникової рослинності):

$$q_{кр} \geq K_b q = K_b C_{np} \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{дон}}{100} \right)^4 \right], \quad (3.8)$$

де, K_b – коефіцієнт пожежної безпеки (приймається від 0 до 1 (табличне значення)).

Провівши низку розрахунків за вищенаведеними залежностями було встановлено густину теплового потоку та порівняно із розрахованою критичною густиною теплового потоку для випадків кожної із 8-ми ділянок. Результати розрахунків наведено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати досліджень критичної густини теплового потоку

№	T, K	$C_0, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$	ε_{np}	$C_{np}, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$	$q_{кр}, \text{Вт}/\text{м}^2$ (табл.)	$q_{кр}, \text{Вт}/\text{м}^2$ (розрах.)	Виконання умови $q_{кр \text{ табл}} \geq q_{кр \text{ розрах}}$
1	545,2	5,77	0,9	5,19	7450	2192,6	+
2	946,6	5,77	0,9	5,19	15400	22809	-
3	971,7	5,77	0,9	5,19	15400	25365,4	-
4	988,7	5,77	0,9	5,19	15400	27213	-
5	753,6	5,77	0,9	5,19	13300	8950	+
6	651,6	5,77	0,9	5,19	7450	4845,9	+
7	542,3	5,77	0,9	5,19	7450	2140,4	+
8	654,3	5,77	0,9	5,19	7450	4932,7	+

Отже, у трьох випадках (ділянки яких відповідають найвищим температурам полум'я, $>940 K$), розрахована густина теплового потоку є значно вищою табличного значення критичної густини теплового потоку для досліджуваного матеріалу $q_{кр}$. Така ситуація потребує влаштування протипожежних бар'єрів та розробки низки пожежно-профілактичних заходів щодо недопущення лучних пожеж (запобігання спалювання сухої трави, стерні, навмисних підпалів тощо).

3.3. Моделювання температурних та вологісних режимів експериментальної лучної пожежі

Фіксацію температури полум'я модельного вогнища лучної пожежі здійснили за допомогою тепловізора Fluke (рис. 3.4).

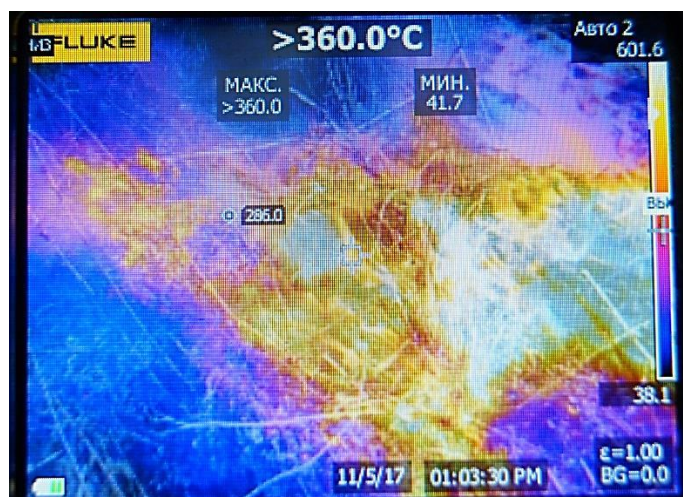


Рисунок 3.4 – Моніторинг температури полум'я модельного вогнища

Здійснивши моделювання температурного поля лучної пожежі вдалося спостерігати температуру полум'я не лише у вимірювальних точках, але й на цілій досліджуваній ділянці (рис. 3.5). Зауважимо, що температура полум'я заходила в діапазоні $+275^{\circ}\text{C}$ - $+720^{\circ}\text{C}$ та збільшувалася по фронту.

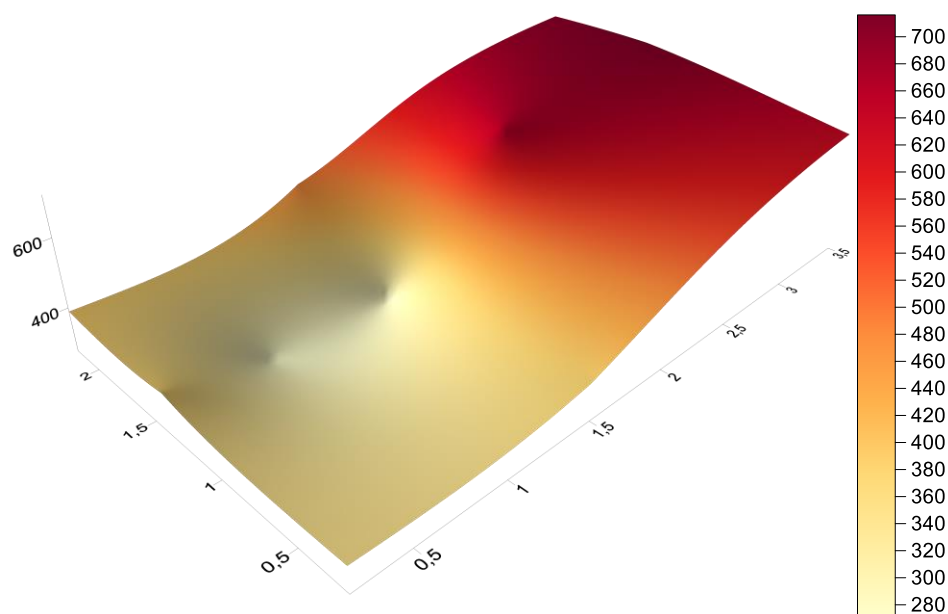


Рисунок 3.5 – 3D моделювання температури полум'я модельного вогнища

Фіксація температури ґрунту та вологості контрольованого підпалу (модельного вогнища) проводилося у 8-ми точках: 1 – місце підпалу і подальше джерело горіння; 2 – через 0,75 м від джерела горіння на схід (фронт); 3 – через 1,5 м від джерела горіння на схід (фронт); 4 – через 2 м від джерела горіння на схід (фронт); 5 – через 0,75 м від джерела горіння на північ (лівий фланг); 6 – через 1,5 м від джерела горіння на південь (правий фланг); 7 – 0,75 м від джерела горіння на захід (тил); 8 – 1,5 м від джерела горіння на захід (тил) [186].

На глибині 5 см у початкових точках горіння температура едафотопу підвищується із $+7^{\circ}\text{C}$ до $+20$ - $+24^{\circ}\text{C}$.

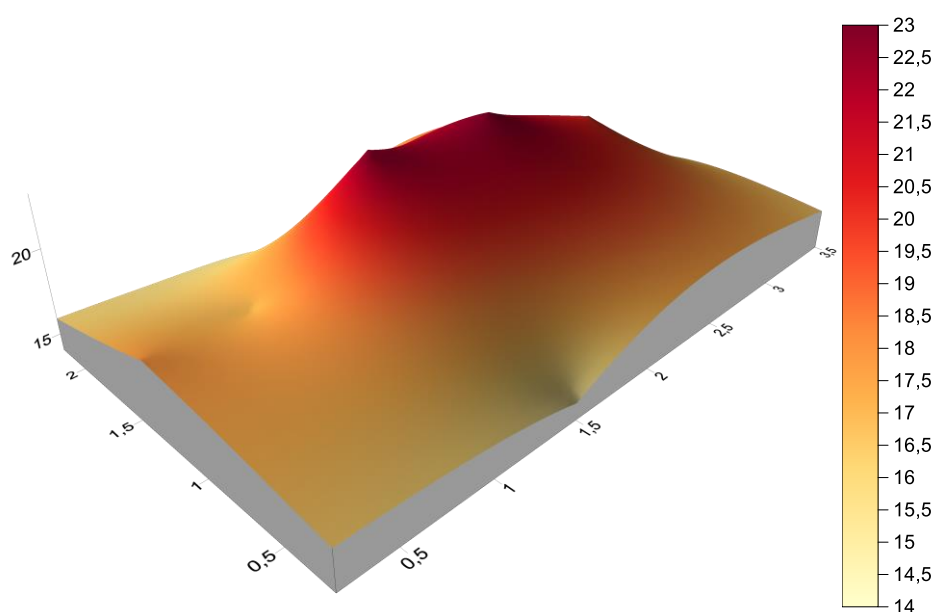


Рисунок 3.6 – 3D моделювання температури ґрунту на глибині 5 см після проходження фронту лучної пожежі

На глибині 10 см у досліджуваних точках горіння максимальна температура едафотопу спостерігається у точці 1 та точці 3 і становила $+17^{\circ}\text{C}$.

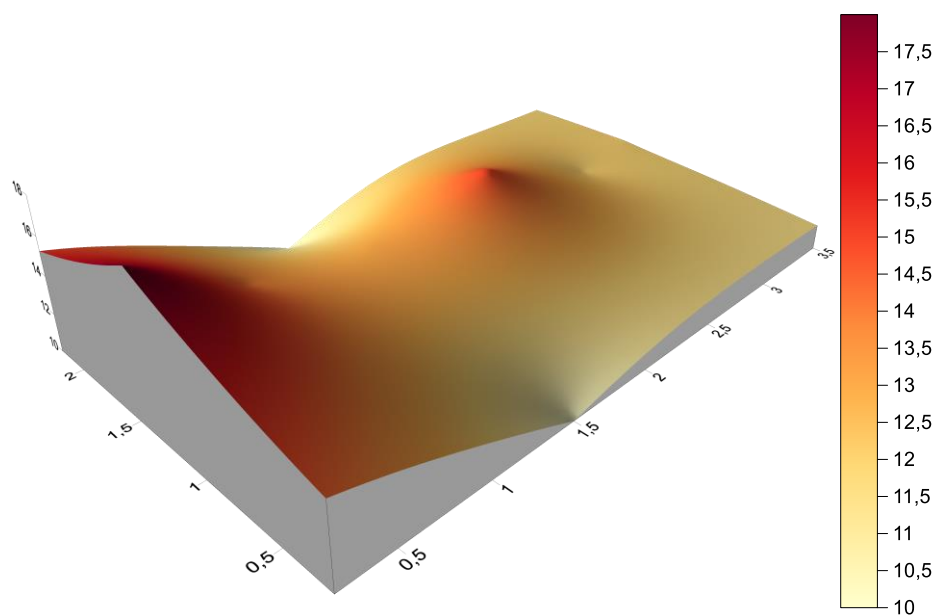


Рисунок 3.7 – 3D моделювання температури ґрунту на глибині 10 см після проходження фронту лучної пожежі

На глибині 20 см у досліджуваних точках горіння максимальна температура едафотопу спостерігається у точці 1 та точці 3 і становила $+15^{\circ}\text{C}$.

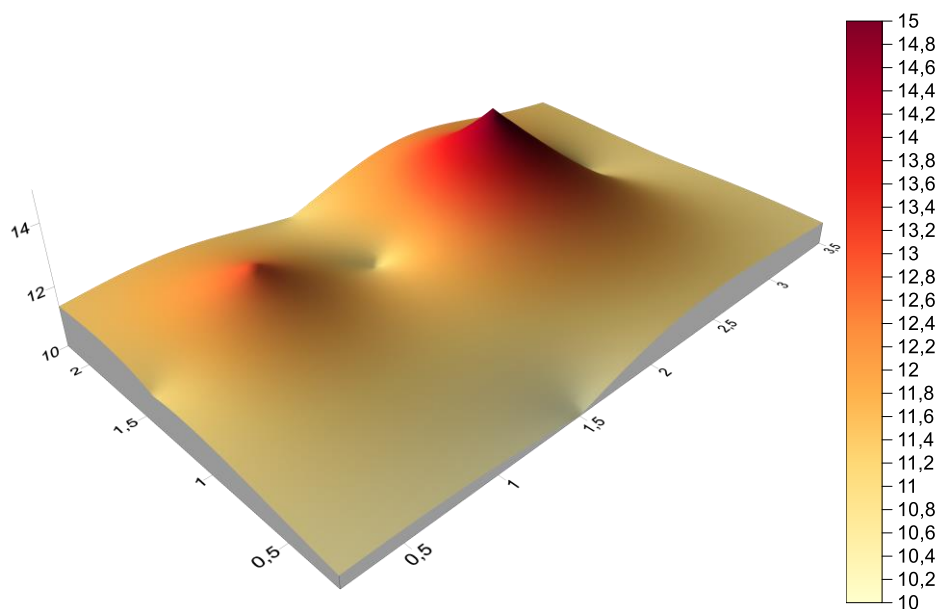


Рисунок 3.8 – 3D моделювання температури ґрунту на глибині 20 см після проходження фронту лучної пожежі

Досліджено, що вологість субстрату модельного вогнища в зоні джерела горіння на глибині 5 см є найнижчою та становила 97,9% у точці 1. Загалом виміряні значення вологості субстрату коливаються в межах 97,0-99,5 %. Яскраво вираженого діапазону зміни вологості на глибині 5 см не спостерігалось. Така ситуація пов'язана перш за все із тим, що досліджувана ділянка знаходиться в низовині та характеризується високим ступенем вологості.

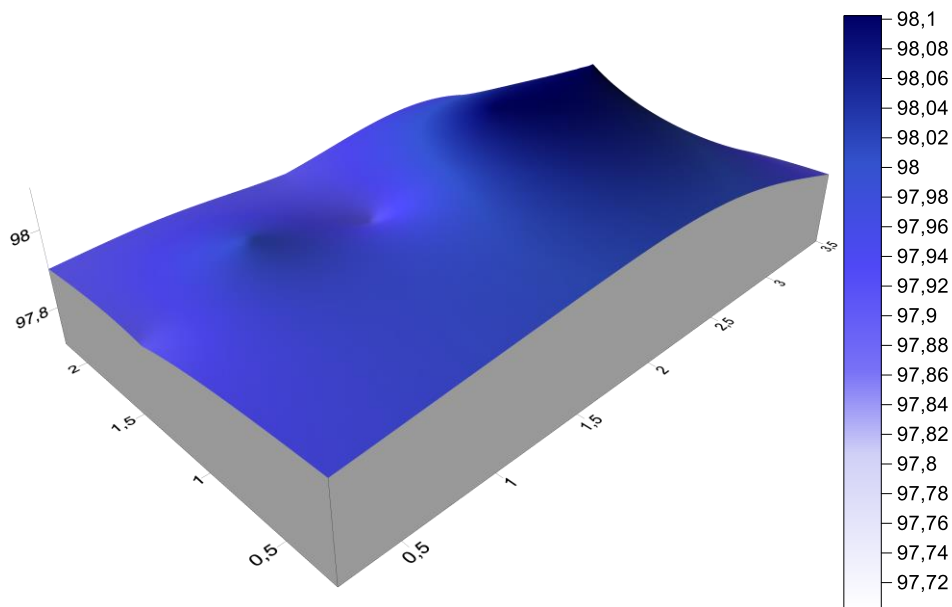


Рисунок 3.9 – 3D моделювання вологості ґрунту на глибині 5 см після проходження фронту лучної пожежі

На глибині 10 см найнижчими значеннями вологості характеризувалися точки 1, 2, 3. Насамперед це пов'язано із безпосереднім впливом температури ґрунту, адже саме у цих точках є максимальні температури полум'я (рис. 3.10).

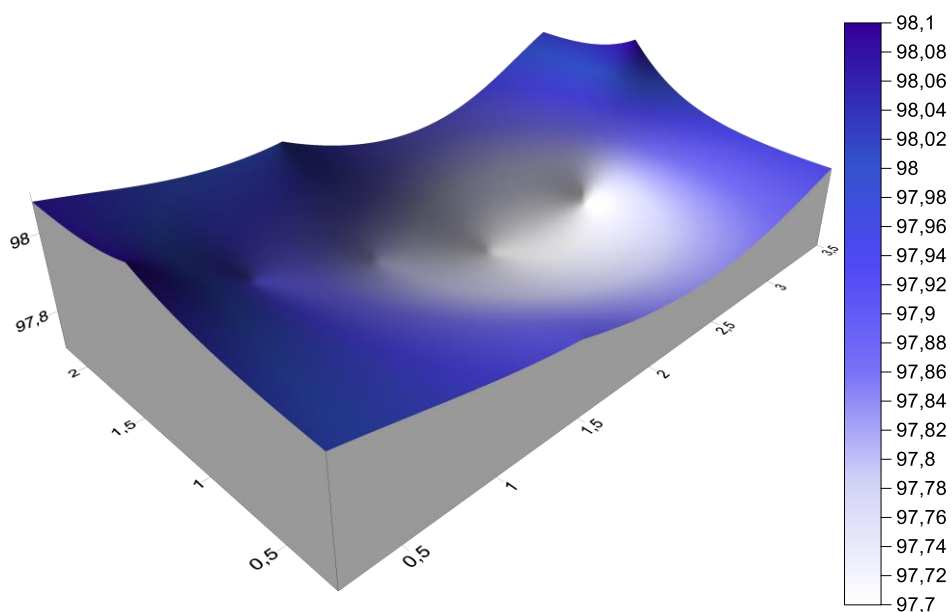


Рисунок 3.10 – 3D моделювання вологості ґрунту на глибині 10 см після проходження фронту лучної пожежі

На глибині 20 см найнижчими значеннями вологості характеризувалися точки 1, 2, 3. І також це пов'язано із температурним впливом лучної пожежі (рис. 3.11).

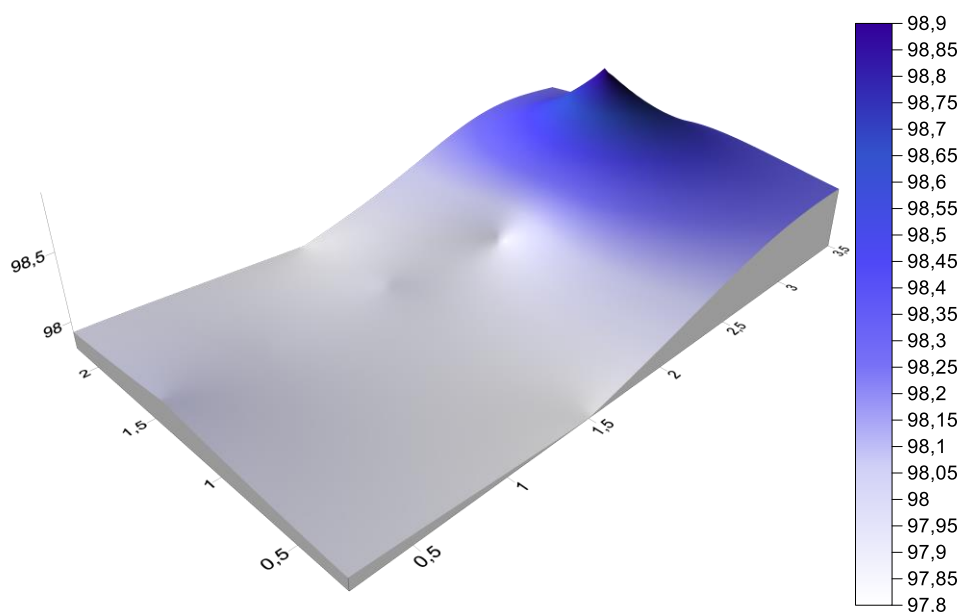


Рисунок 3.11 – 3D моделювання вологості ґрунту на глибині 20 см після проходження фронту лучної пожежі

3.4. Моделювання поширення лучних пожеж за допомогою WFDS

Моделювання процесів виникнення та поширення пожеж, зокрема й в природних екосистемах, набуває дедалі більшого розвитку. Перспективи застосування емпіричних, фізичних та математичних моделей в комплексі з електронно-обчислювальною технікою забезпечило можливість реалізації комп'ютерних моделей, які не лише створюють уявлення про процес горіння, але й дають змогу спостерігати за його перебігом. У сфері дослідження природних пожеж сьогодні розроблені та ефективно використовуються комп'ютерні моделі, в основі роботи яких закладені чисельні методи фізики горіння речовин і матеріалів. Прикладом цьому є використання моделі WFDS [63], що призначена для дослідження пожеж в природних екосистемах, зокрема лісових (низових, верхових) і трав'яних. Базова структура моделі дає можливість дослідити особливості поширення полум'я горючою поверхнею, оцінити параметри горіння, встановити величини показників пожежної небезпеки горючого середовища. Та разом з тим важливо також досліджувати процеси горіння природного горючого матеріалу залежно від зміни таких чинників, як: фізико-хімічні властивості цього матеріалу, виду джерела займання, а також та гідрометеорологічні умови.

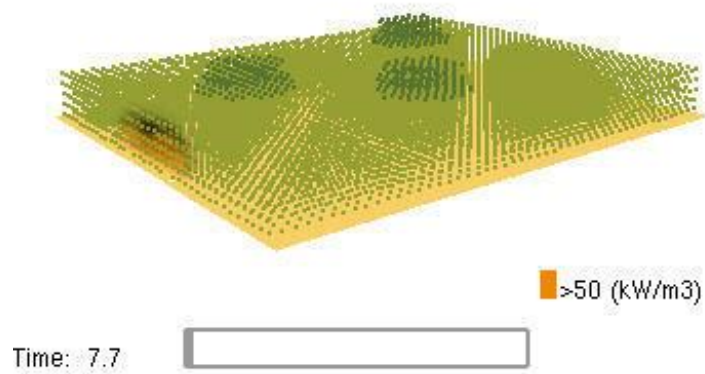
Дослідженням пожеж з використанням WFDS присвячено низку праць. Якщо в роботі [132] з використанням такої моделі досліджено особливості зміни швидкості поширення фронту пожежі від висоти трави, то в роботі [39] — втрату маси та потужність виділення тепла від згоряння посіченої деревини. Також уваги заслуговують праці іноземних вчених, зокрема спрямовані на дослідження пожежної небезпеки хвойних насаджень. Але зазначимо, що процеси виникнення і поширення пожеж в середовищі трав та чагарників досліджено не достатньо. Тому було виконано дослідження пожежі ділянки, що охоплювала ріст не лише трави, а й інших компонентів фітоценозу, зокрема чагарників.

Дослідження проводили із врахуванням умов навколишнього середовища, а також фізико-хімічних властивостей горючого матеріалу. Метеорологічні умови для досліджень були такими: температура повітря +27 °С, відносна вологість

повітря 24,5 %, вітер змінного напрямку 1,5 м/с, атмосферний тиск 746 мм рт. ст. Вологість горючого матеріалу: трави в нескошеному стані — $13,11 \pm 1\%$, а осередків трави у вигляді стогів — $35,15 \pm 1\%$. Інші фізичні властивості горючого матеріалу застосовували відповідно до [63]. Для моделювання побудували прямокутну ділянку розмірами $20 \times 16 \times 6$ м. Параметри обчислювальної сітки — $50 \times 40 \times 15$. Підпал здійснювали шляхом формування горючої смуги розмірами $3 \times 0,3$ м на початку дослідної ділянки. Час для моделювання становив 180 с. Для спостереження за процесом моделювання використовували додаток Smokeview, що призначений для візуалізації чисельних розрахунків, згенерованих моделями пожеж. Цей додаток візуалізує полум'я, дим та інші параметри пожежі за допомогою застосовуваних традиційних наукових методів, зокрема відображення потоку індикаторних частинок (2d або 3d контурів газових потоків), застосовуючи такі дані, як температура та вектори потоку, що показують його напрямок і величину. Smokeview також візуалізує статичні дані в певний час за допомогою дво- або тривимірних контурних даних, використовуючи вектори температури та потоку із врахуванням їх напрямку та значення. Використовуючи додаток, отримали зображення процесу горіння на 1-ій та 2-ій хв від початку займання горючого матеріалу, а також динаміки потужності випромінювання на пожежі (рис. 3.12).

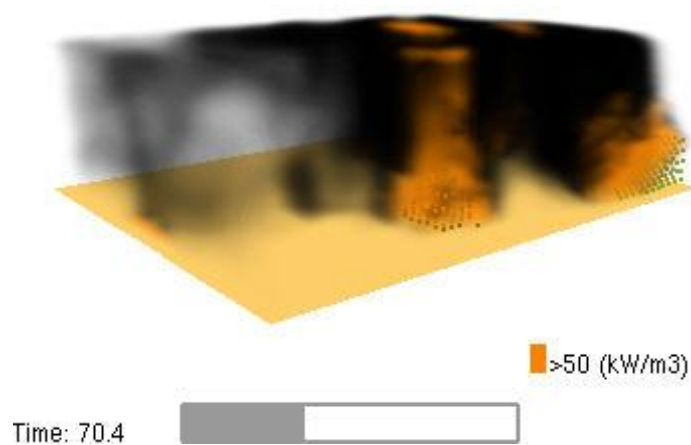
Для об'єктивності експерименту дослідили зміну показників пожежонебезпечності, зокрема потужності тепловиділення та температури за часом горіння. З цією метою у файлі для моделювання розташували віртуальні термопари в 3 ряди за довжиною дослідної ділянки, інтервал між рядами — 4 м.

Smokeview 5.6



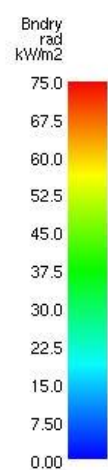
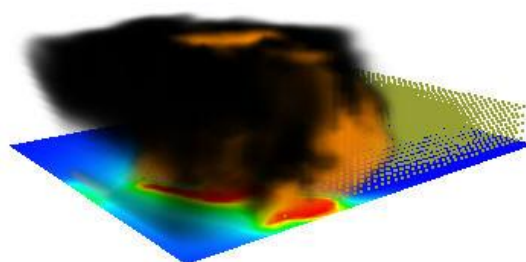
a)

Smokeview 5.6



б)

Smokeview 5.6

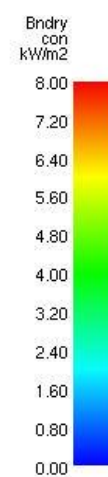
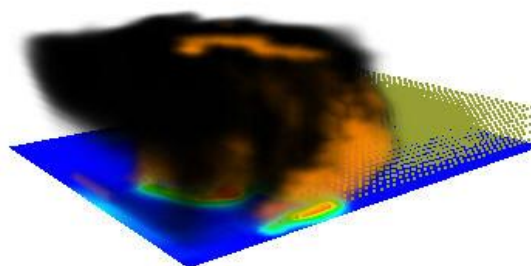
 >50 (kW/m³)

Time: 51.1



B)

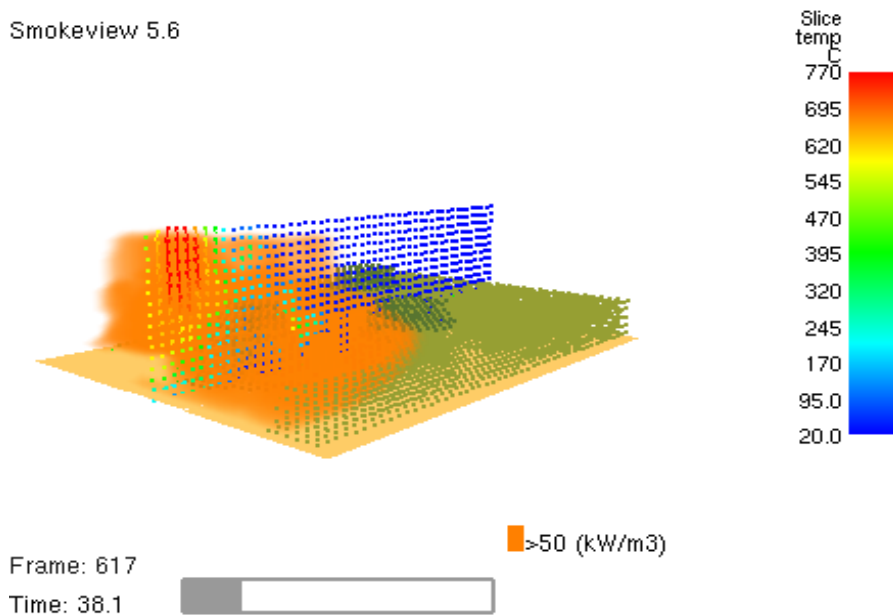
Smokeview 5.6

 >50 (kW/m³)

Time: 50.8



Г)



г)

Рисунок 3.12 – Візуалізація процесу пожежі: а) – на 8-ій с від початку горіння; б) – на 71-й с від початку горіння; в) – з відображенням потужності радіаційного випромінювання в середовищі пожежі; г) – з відображенням потужності величини конвективних потоків в середовищі пожежі; г) – з відображенням величини розподілу середньої температури полум'я в середовищі пожежі

В цілому, моделювання пожежі тривало 180 с. Стрімке полум'яне горіння припинилося на 66 с від початку підпалу, а після цього спостерігалось поодинокі горіння та тління досліджуваної ділянки. Досліджену потужність тепловиділення пожежі за результатом моделювання зображено на рис 3.13.

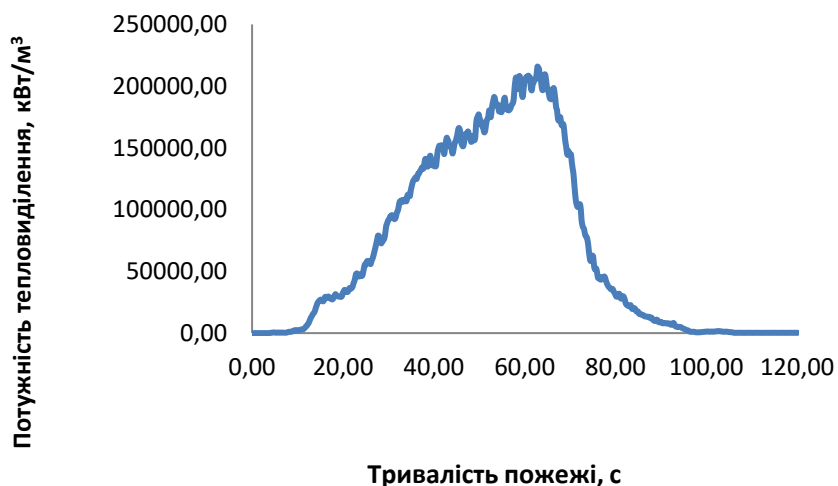


Рисунок 3.13 – Графічне відображення потужності виділення тепла від тривалості пожежі

Встановлено, що максимальна потужність від пожежі досліджуваної ділянки досягається приблизно на 65-ій секунді і становив 209650 кВт/м³, а, починаючи з 66 с, ця величина мала тенденцію до спадання.

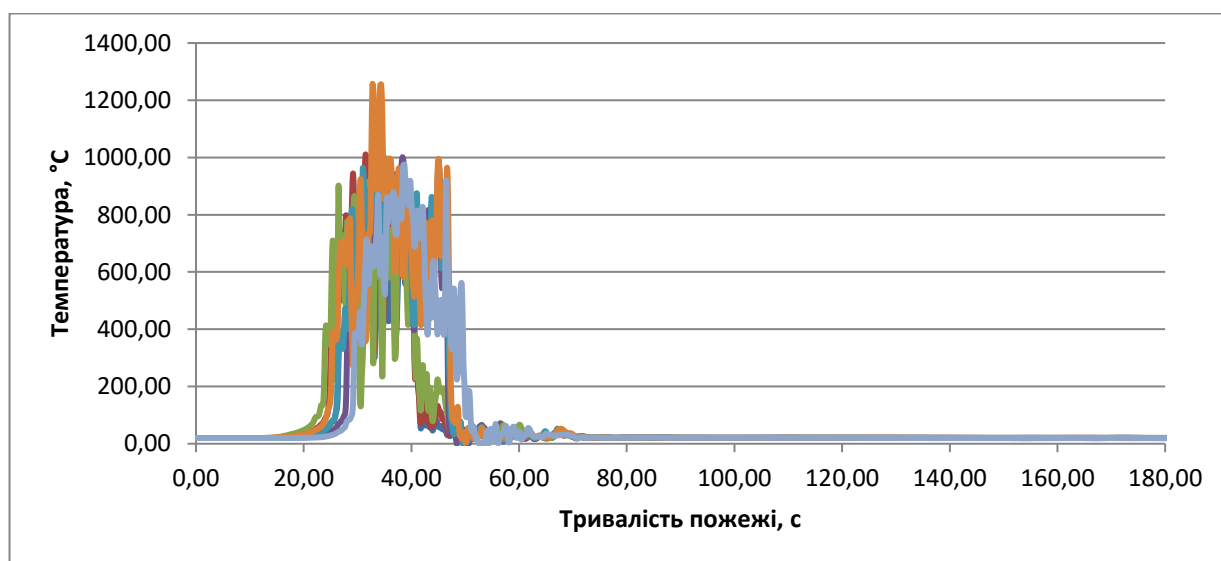


Рисунок 3.14 – Графічне відображення зміни температури полум'я в зоні горіння від тривалості пожежі

Встановлено, що максимальне значення температури полум'я становило понад +1250°C, що зауважено на 33 с в межах горіння трави у вигляді стогів.

Проте, з 66-ї с спостерігалось зниження температури полум'я в середовищі горіння дослідної ділянки до температури навколишнього середовища.

3.5. Температурний вплив на екологічний стан ґрунту під час лучних пожеж

3.5.1. Температурний вплив на міграцію важких металів

Відбір проб ґрунтів для досліджень міграції рухомих форм важких металів здійснювався із врахуванням давності (за роками) горіння лучної рослинності та лісової підстилки. Всього відібрано 12 проб ґрунтів із глибин 5 см, 10 см та 20 см. Ділянка 1 (проби 1, 2, 3) – молоді соснові насадження, пожежа, яка виникла за 3,5 роки до початку проведення експерименту, знищила всю лісову підстилку, підріст та спричинила термічну деструкцію ґрунту, нижнім частинам стовбурів і гілкам *Pinus sylvestris* L., яка набула розвитку внаслідок штучного зарощування (2014 рік). Ділянка 2 (проби 4, 5, 6) – домінує лучна рослинність, яка повністю вигоріла за 2 роки до початку проведення експерименту, пожежа спричинила термічну деструкцію ґрунту (2015 рік). Ділянка 3 (проби 7, 8, 9) – домінує лучна рослинність, яка повністю вигоріла за 1,5 роки до початку проведення експерименту, пожежа спричинила термічну деструкцію ґрунту (2016 рік). Ділянка 4 (проби 10, 11, 12) – модельне вогнище внаслідок якого повністю вигоріла лучна рослинність, пожежа спричинила термічну деструкцію ґрунту (2017 рік). Модельне вогнище утворене із дотриманням вимог пожежної безпеки без перекидання вогню на інші, не дослідні, ділянки [49, 51, 144]. Географічні координати модельного вогнища - 50.158510, 23.783718.

Внаслідок аналізу накопичення важких металів в едафічних горизонтах постпірогенних ґрунтів встановлено, що найбільше їх депонують ділянка 2 (проби 4, 5, 6) та ділянка 4 (проби 10, 11, 12). На найбільш забрудненій важкими металами, ділянці 2, спостерігається значне накопичення кадмію в едафічних горизонтах (0,31-0,66 мг/кг), значення якого наближається до гранично-допустимої концентрацій для ґрунтів (0,7 мг/кг). Також на зазначеній ділянці 2 відмічено найбільший вміст рухомих форм нікелю (1,52-2,80 мг/кг), при гранично-допустимих концентраціях для ґрунтів (4 мг/кг). Високі показники

рухомих форм важких металів на ділянці 2 пояснюються розташуванням її безпосередньо біля автомобільної дороги місцевого значення, де окрім природнього вмісту, відбувається накопичення їх в ґрунтах внаслідок експлуатації транспорту. На ділянці 4 підвищений вміст в ґрунтах важких металів пояснюється недавнім проходженням фронту низової лісової пожежі, внаслідок якої перегоріла вся рослинність до мінерального шару [89, 90, 91, 92, 163].

Найменший вміст важких металів є на досліджуваній ділянці 1, яка піддавалася впливу вогню найдавніше – за 3,5 роки до початку моніторингу. Тут значення рухомих форм важких металів наближені до фонових. Такі показники є абсолютно прийнятними, очевидно, що екосистема самовідновлюється внаслідок протікання природних фітомеліоративних процесів на 3-4 рік після впливу пірогенного чинника (рис. 3.15).

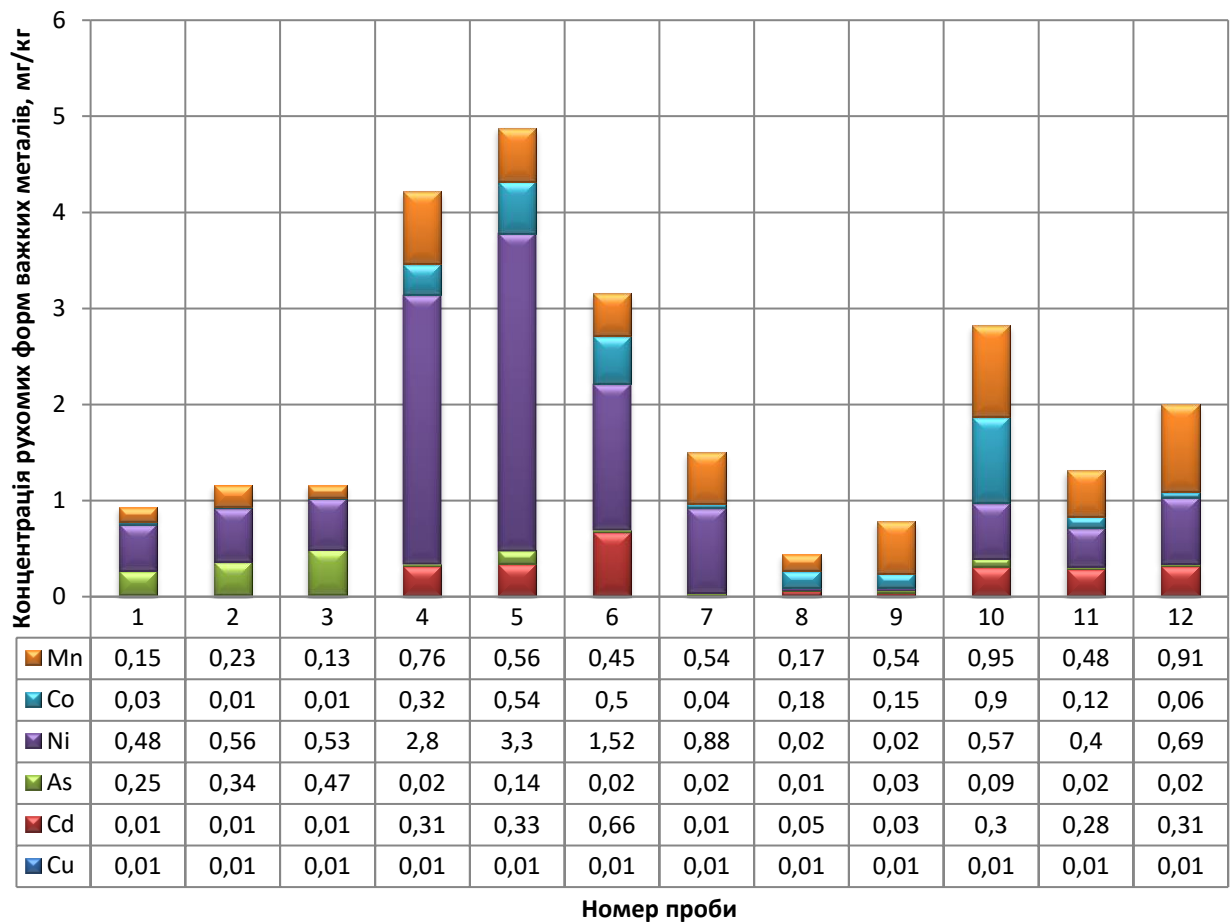


Рисунок 3.15 – Вміст важких металів у досліджуваних пробах, мг/кг

Загалом, на усіх досліджуваних постпірогенних ділянках найбільший вміст рухомих форм спостерігається для нікелю, марганцю та кобальту. Також високі показники у едафічних горизонтах притаманні кадмію та миш'яку, які є

надзвичайно токсичними. Вміст міді у ґрунтах наближений до фонових (рис. 3.16).

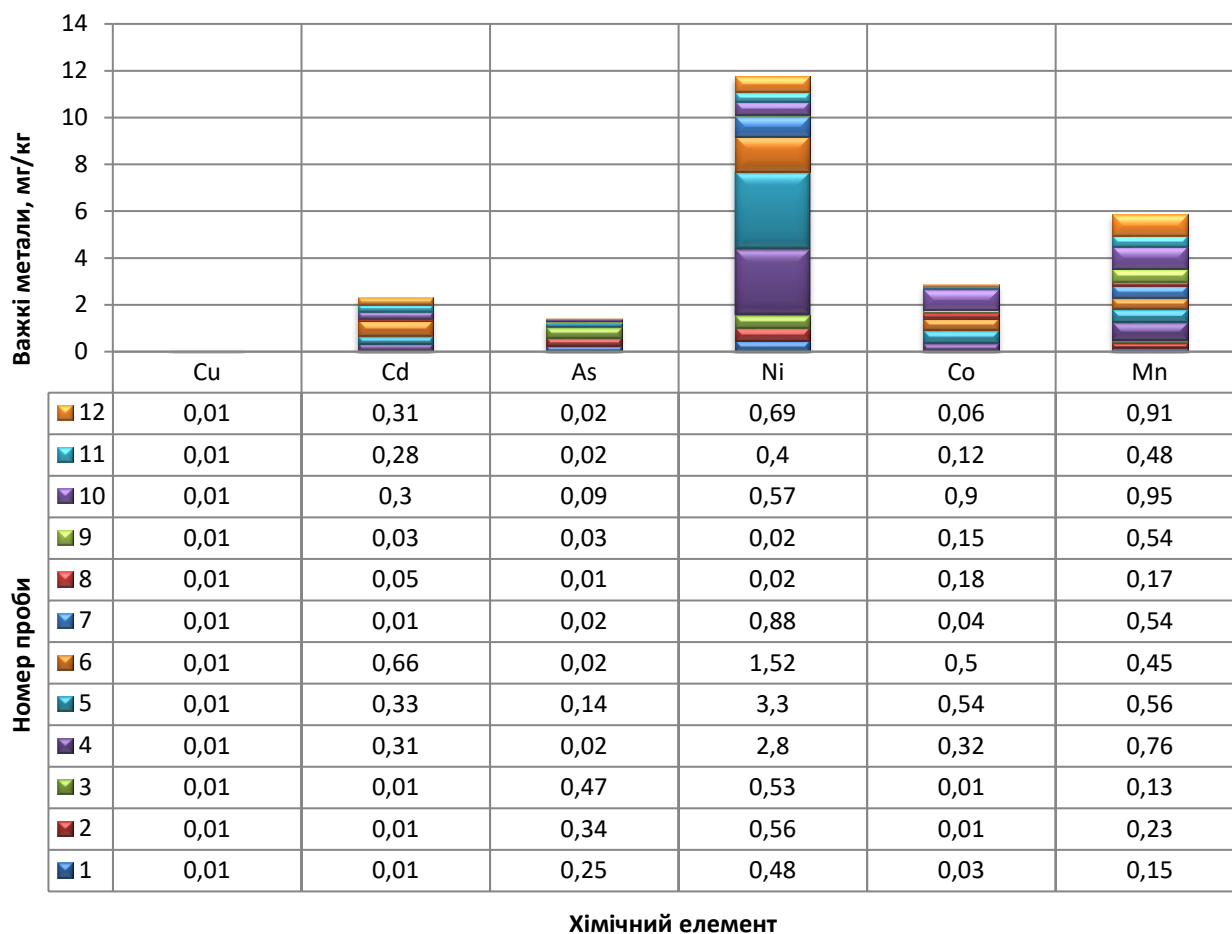


Рисунок 3.16 – Сумарний вміст важких металів у досліджуваних пробах за кожним елементом окремо, мг/кг

Токсична дія нікелю на організм (при депонуванні його в тканинах) полягає в індукції гострих і хронічних запальних процесів, змінах функціональної активності макрофагів; вазоконстрикторному ефекті; модифікації метаболізму ліпідів, білків (ферментів), глікогену, глюкози, ДНК, РНК; посиленні перекисного окиснення ліпідів; збільшенні проникливості біологічних мембран; деструкції мітохондрій, змінах енергетичного обміну [106]. Проводили інгаляційне отруєння мишей сполуками NiSO_4 , Ni_3S_2 , NiO впродовж 6 год на день, 5 днів на тиждень. Визначали імунотоксичність цих сполук за 65 днів. Концентрація Ni_3S_2 1,8 мг $\text{Ni}/\text{м}^3$ призводила до зменшення маси тимусу, збільшення кількості легеневих лімфатичних вузлів, зменшення антитілоутворюючих клітин. Результати вказують на те, що вплив інгаляцій мишам нікелю може мати різний вплив на імунну

систему залежно від дози та фізико-хімічної форми сполуки нікелю. Ці індуковані нікелем зміни можуть сприяти значній імунофункції [45].

Марганець у ґрунтах знаходиться у вигляді дво-, три- і чотиривалентного іона. Сполуки марганцю добре розчинні, особливо за кислої реакції середовища. У ґрунті марганець може заміщувати обмінні основи – Ca^{2+} і Mg^{2+} , а у ґрунтовому розчині утворює комплекси з органічною речовиною (в основному з фульвокислотами). З гідроксидами заліза марганець утворює залізомарганцеві конкреції [155]. Токсична дія марганцю на людину та теплокровних пов'язана з ураженням центральної нервової системи, де він спричиняє органічні зміни екстрапірамідального характеру, у тяжких випадках – паркінсонізм. В основі екстрапірамідальної недостатності в разі хронічного отруєння марганцем лежить ураження дофамінергічної системи мозку. Пригнічення біосинтезу катехоламінів пов'язане з впливом марганцю на окислювальні ферменти, локалізовані на мітохондріях, де нагромаджується марганець. Збій у біосинтезі катехоламінів має вплив на поведінку і зміни з боку психіки, в разі хронічного отруєння марганцем. Але марганець є і політропною отрутою, що вражає також легені, серцево-судинну і гепатобіліарну системи, впливає на еритропоез, ембріогенез, спричиняє алергічний і мутагенний ефекти [72, 160].

На відміну від інших металів кобальт ґрунту є нетоксичним. Вміст його рухомих сполук визначають для оцінювання повноцінності мікроелементного живлення рослин, або у випадку оцінювання небезпеки поліелементного забруднення – для встановлення можливих ефектів антагонізму-синергізму між сполуками кобальту та інших важких металів, які можуть суттєво впливати на накопичення токсичних металів у рослинних тканинах [107].

Кадмій негативно впливає на біохімічні процеси та фізіологічні функції в організмі тварин і людини. Особливістю шкідливої дії кадмію є швидке його засвоєння організмом і повільне виведення, що призводить до кумуляції цього металу в тканинах. Кадмій нагромаджується переважно у печінці і нирках [8] і має тривалий період напіввиведення (до 30 років), тобто, у прикладному аспекті можна вважати, що для тварин депонування кадмію в організмі є позитивним. Токсичний ефект кадмію найбільш виражений для нирок [4] і кісткової тканини. У нирках кадмій спричиняє дисфункцію нефронів, що призводить до пригнічення зворотного всмоктування амінокислот, глюкози, фосфору і олігопептидів. У кістковій тканині під впливом кадмію порушуються процеси кальцифікації.

Кадмій спричиняє онкологічні захворювання, може бути причиною виникнення мутацій, руйнування ланцюга ДНК, хромосомних аберацій. Кадмій впливає на трансмембранну передачу гормональних сигналів у клітинах [44], репродуктивну функцію і процеси пероксидного окиснення в організмі. Він змінює активність протеїнкінази C і мітоген-протеїнкінази, порушує метаболізм циклічної АМР [47]. Низькі дози кадмію в організмі тварин стимулюють апоптоз клітин, у разі збільшення дози кадмію у клітинах починаються некротичні зміни [156].

Для ґрунтів природних і агроландшафтів Cd не є забруднювачем, а коефіцієнт його концентрації в середньому коливається від 0,15 до 0,95. Характер міграції Cd за профілем дерново-підзолистих ґрунтів має чітко виражений елювіально-ілювіальний, сірих опідзолених – радіальний характер, а у темно-сірих опідзолених ґрунтах Cd розподіляється рівномірно по всьому ґрунтовому профілю [142]. У розчинній формі кадмій є більш токсичним, ніж це наголошується значеннями його рухливих форм ГДК. В ґрунтовому розчині кадмій може утворювати комплексні іони CdCl^+ , CdOH^+ , CdHCO_3^+ , $\text{Cd}(\text{OH})_3^-$ та органічні комплекси. Можна припустити, що рухливість цих іонів буде сильно залежити від концентрації кальцію, рН ґрунтового розчину та інших хімічних чинників, які будуть зменшувати рухливість іонів кадмію, а значить і його токсичний вплив [162].

Миш'як – отрута резорбтивної дії. Гостра токсичність його сполук є меншою, у порівнянні з іншими металами. У розчиненому вигляді миш'як трапляється в три- і п'ятивалентній формах (H_2AsO_3 , H_3AsO_4), головним чином аніонний, у вигляді солей — арсенітів і арсенатів, а також у зв'язаній з органічними лігандами формі. Джерела забруднення довкілля миш'яком включають в себе стічні води збагачувальних фабрик, шкіряних заводів, підприємств, що виробляють пестициди, відходи металургійних підприємств, скиди рудницьких відходів, а також змиви з сільськогосподарських угідь, на яких застосовуються пестициди. Співвідношення природних і техногенних джерел забруднення цим елементом складають 1:3 [88, 153]. Забруднення водного середовища неорганічним водорозчинним миш'яком значною мірою впливає на плодючість риб. Це проявляється, зокрема, у зниженні кількості викиданої ікри і скороченні чисельності пар плідників, яких використовують у нересті. За впливу токсиканта в 1,5 рази знижується рівень транскрипторів печінкового вітелогеніну,

відбуваються порушення функціонування гіпоталамо-гіпофізарної системи та проліферації спермій [16, 66,].

Що стосується розподілу концентрацій досліджуваних важких металів у постпірогенних едафічних горизонтах, то можемо констатувати, що найбільший їх вміст знаходиться у діапазоні 0-1 мг/кг. Переважно це такі важкі метали як мідь та миш'як (0,01-0,47 мг/кг). Дещо вище накопичення кадмію (до 0,66 мг/кг) та кобальту (до 0,9 мг/кг), що відповідає діапазону 0-1 мг/кг. Нікель переважає у всіх діапазонах розподілу (0-1, 1-2, 2-3, 3-4 мг/кг). Розподіл важких металів у залежності від їх концентрації у постпірогенних едафічних горизонтах зображено на рис. 3.17.

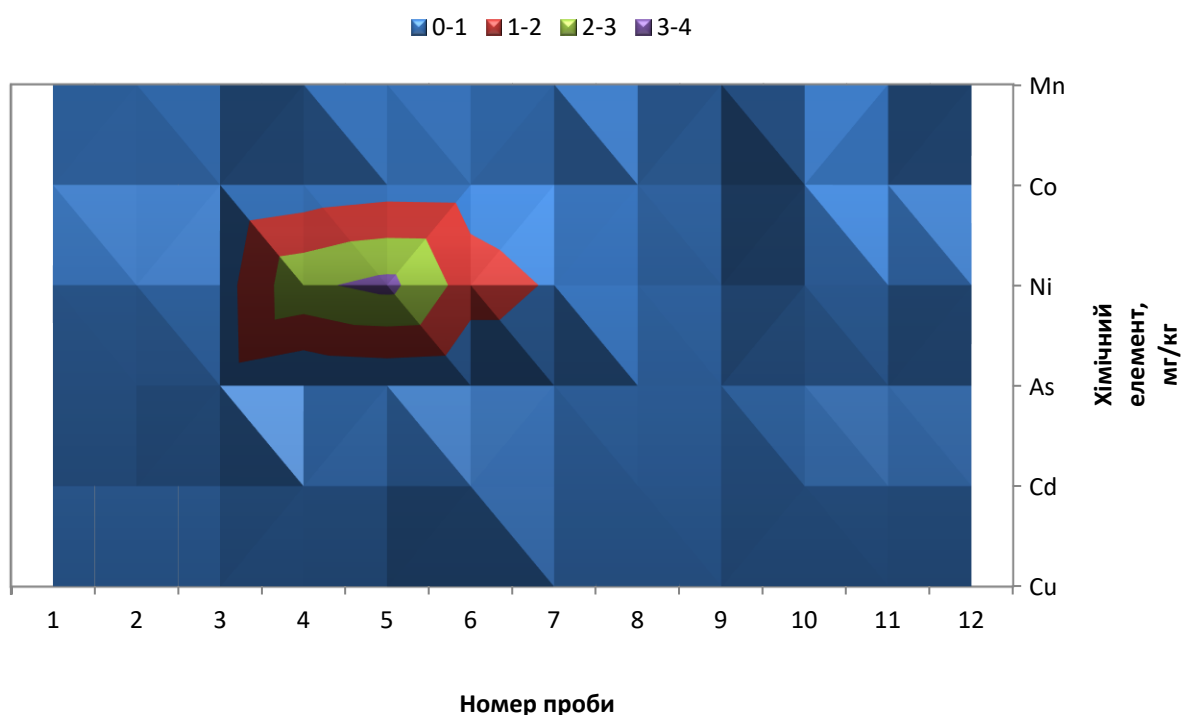


Рисунок 3.17 – Розподіл важких металів у залежності від їх концентрації у постпірогенних едафічних горизонтах, мг/кг

Коефіцієнти кореляції Пірсона між показниками концентрації рухомих форм важких металів у постпірогенних едафічних горизонтах дали змогу оцінити взаємозалежність між сумарними концентраціями окремих важких металів. Найвищий додатний коефіцієнт кореляції відповідає кобальту та кадмію (0,627099), тобто ці елементи рівномірно збільшують або зменшують свою присутність у відношенні один до одного. Найвищий від'ємний коефіцієнт кореляції відповідає марганцю та миш'яку (-0,57968), тобто при збільшенні Mn

концентрація As знижується та навпаки. Між рештою досліджуваних елементів спостерігається низький кореляційний зв'язок (0,5). Відсутній взаємозв'язок між концентраціями Ni та As, тобто солі за участю цих елементів не впливають одна на одну та є розчинними в ґрунтового середовищі (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 – Коефіцієнти кореляції Пірсона між показниками концентрації рухомих форм важких металів у постпірогенних едафічних горизонтах

	Cu	Cd	As	Ni	Co	Mn
Cu		0	0	0	0	0
Cd			-0,45735	0,514606	0,627099	0,504914
As				-0,11492	-0,3018	-0,57968
Ni					0,407292	0,312699
Co						0,553345
Mn						

Найбільш ефективними технологіями відновлення деастрованих територій внаслідок пірогенного чинника є рекультивация та фітомеліорация. Зауважимо, що на ділянках, де проходили низові лісові пожежі, навіть без втручання людини, відбуваються процеси заростання рослинністю так звані постпірогенні сукцесії. Такі постпірогенні сукцесії нами спостерігалися на території досліджуваного регіону. Рослинність на перегорівших ділянках у перший рік постпірогенного розвитку характеризується спонтанними поодинокими видами. Через 2-3 роки характеризується груповим розташуванням. Повне природне заростання перегорілої ділянки (природна фітомеліорация) відбувається на 4-5 рік після виникнення горіння. В Україні також є практика штучного вирощування рослинності (сосни звичайної) на згарищах. Це стосується південних областей України, де у 2007 році протікали одні з найбільших в історії лісові пожежі.

Таким чином, під час вивчення впливу низових лісових пожеж на концентрацію рухомих форм важких металів у різних ґрунтових генетичних горизонтах встановлено, що найвища концентрація спостерігається у верхніх шарах, окрім ділянки, яка зазнала давнього пірогенного впливу (за 3,5 роки до початку проведення моніторингу). Тобто, екологічне відновлення території відбувається на 3-4 рік після пірогенного чинника.

На усіх досліджуваних постпірогенних ділянках найбільший вміст рухомих форм спостерігається для нікелю, марганцю та кобальту. Також високі показники у едафічних горизонтах притаманні кадмію та миш'яку, які є

надзвичайно токсичними. Вміст міді у ґрунтах наближений до фонових. Найбільший вміст важких металів знаходиться у діапазоні 0-1 мг/кг. Переважно це такі важкі метали як мідь та миш'як (0,01-0,47 мг/кг). Дещо вище накопичення кадмію (до 0,66 мг/кг) та кобальту (до 0,9 мг/кг), що відповідає встановленому діапазону 0-1 мг/кг. Нікель переважає у всіх діапазонах розподілу.

Коефіцієнти кореляції Пірсона між показниками концентрації рухомих форм важких металів у постпірогенних едафічних горизонтах дали змогу оцінити взаємозалежність між сумарними концентраціями окремих важких металів. Найвищий додатній коефіцієнт кореляції відповідає кобальту та кадмію (0,627099), тобто ці елементи рівномірно збільшують або зменшують свою присутність у відношенні один до одного. Найвищий від'ємний коефіцієнт кореляції відповідає марганцю та миш'яку (-0,57968), тобто при збільшенні Mn концентрація As знижується та навпаки.

Моніторинг впливу низових лісових пожеж на концентрацію важких металів у едафічних горизонтах є важливим з точки зору ренатуралізації довкілля та розробки профілактичних заходів з попередження лісових пожеж та пожеж у природних екологічних системах (лучних пожеж).

3.5.2. Температурний вплив на міграцію мінеральних речовин

Розглянувши вплив температурного поля на міграцію Ca в генетичних горизонтах слід відмітити, що найвищий його вміст спостерігався на глибині 5 см у місці формування модельного вогнища (0,68 мг/кг). На глибині 10 см (0,42 мг/кг) і 20 см (0,47 мг/кг) показники були вище середнього по всіх досліджуваних ділянках і горизонтах (0,34 мг/кг). Найнижчі показники в усіх горизонтах належать до досліджуваної ділянки 2, де лучна пожежа виникла за 1,5 роки до початку проведення досліджень (рис. 2). Загальновідомо, що Ca забезпечує належний розвиток кореневої системи, сприяючи формуванню більшої кількості корневих волосків, за допомогою яких із ґрунту до рослин надходить основна маса води й розчинених у ній поживних речовин [139]. Це особливо важливо для відновлення земель у після пожежний період.

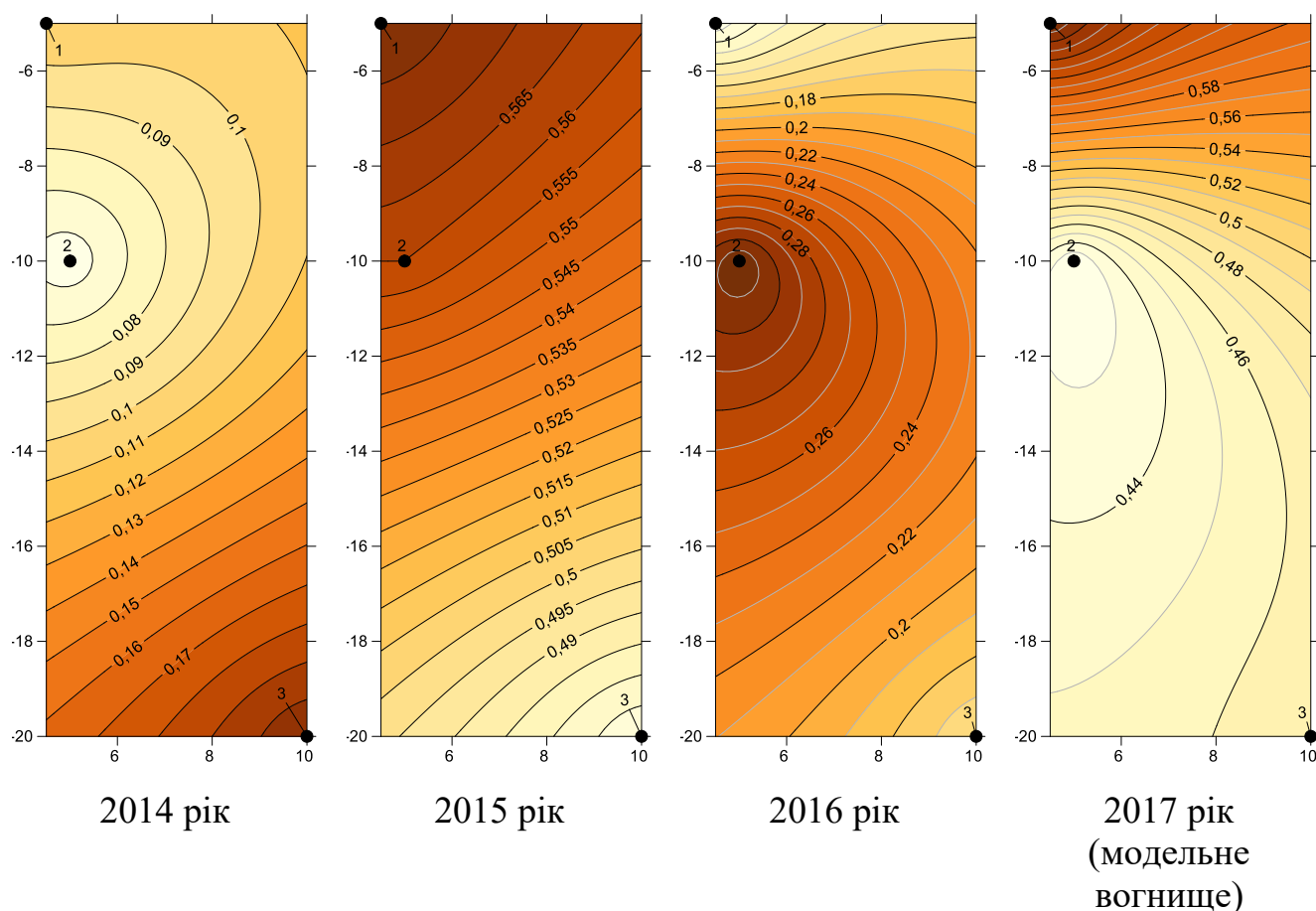


Рисунок 3.18 – Значення Са для досліджуваних генетичних горизонтів
постпірогенних ґрунтів

Розглянувши вміст К у генетичних горизонтах зазначимо, що його найвищий вміст спостерігається на глибині 5 см у місці формування модельного вогнища (1421,7 мг/кг), що є надзвичайно високим показником і пов'язаний із спалюванням рослинності. Надзвичайно низькі показники К спостерігаються для ділянки 2 (рис. 2).

За даними різноманітних джерел [139] К є одним з головних макроелементів, що покращує родючість ґрунту, активно бере участь у процесах фотосинтезу, стимулює процеси тургору в клітині (сприяє кращому надходженню речовин до органів рослин), регулює осмотичний тиск (проникність, водорегулювання), процеси дихання (покращує роботу продишувальних апаратів) тощо. Найбільшу потребу в K_2O відчувають легкі дерново-підзолисті ґрунти Полісся, осушені торф'яники, сірі лісові ґрунти і вилужені чорноземи Лісостепу.

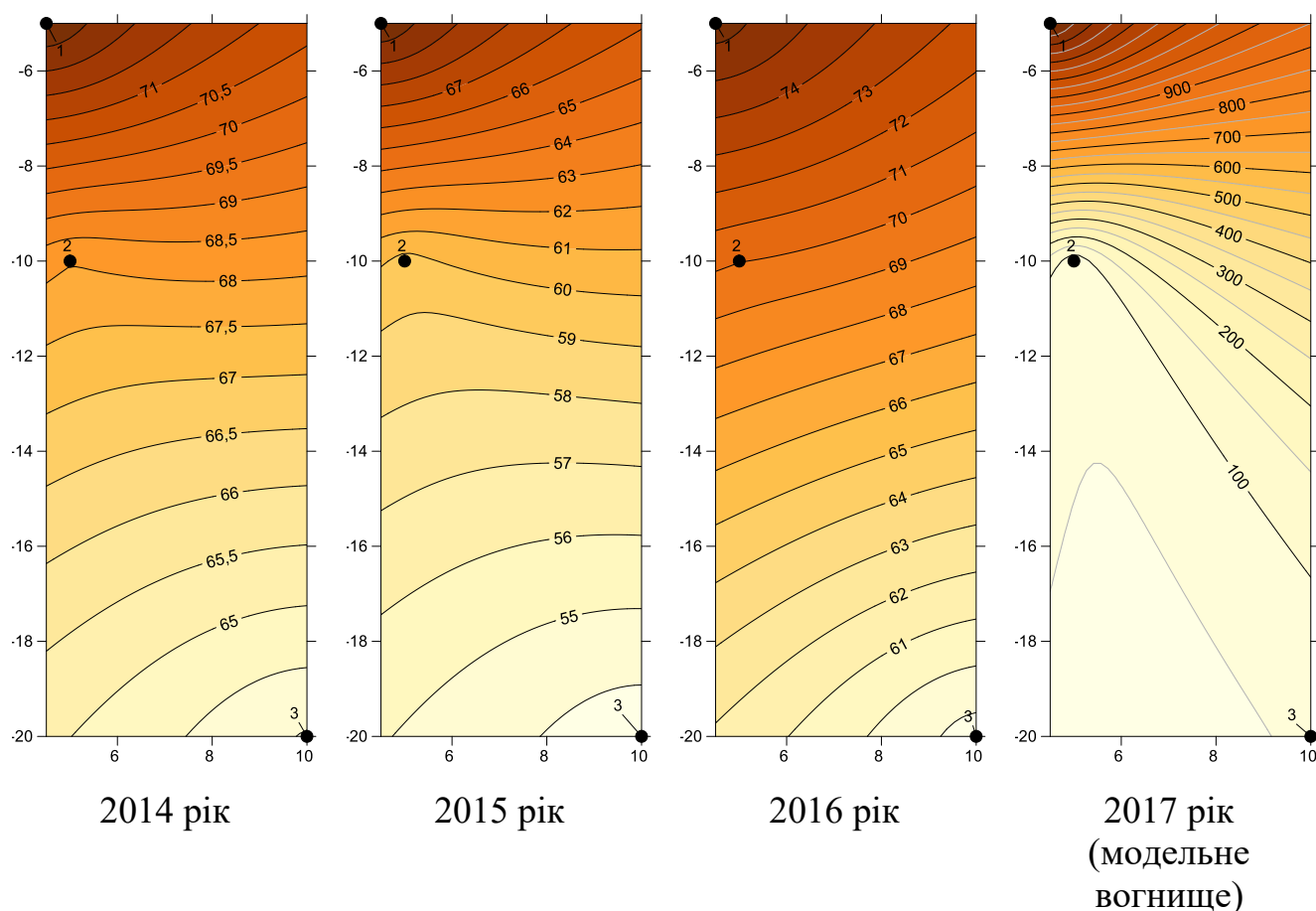


Рисунок 3.19 – Значення K_2O для досліджуваних генетичних горизонтів постпірогенних ґрунтів

Найвищі показники Mg для досліджуваних ділянок спостерігався на ділянці 1, де зростали обгорілі молоді сосни. Вміст за генетичним горизонтом становив: 5 см – 0,47 мг/кг, 10 см – 0,46 мг/кг, 20 см – 0,56 мг/кг. За дефіциту магнію в рослинах погіршується ріст і продукційний процес, уповільнюється синтез азотовмісних сполук, знижується якість продукції, зменшується вміст хлорофілу та стійкість проти хвороб. Проявляється це у вигляді своєрідного міжжилкового хлорозу [139]. Дефіцит магнію в нашому випадку притаманний ділянці 3, де його показники становили: 5 см – 0,95 мг/кг, 10 см – 0,053 мг/кг, 20 см – 0,105 мг/кг, що пов'язане із розорюванням та температурним впливом [27, 164].

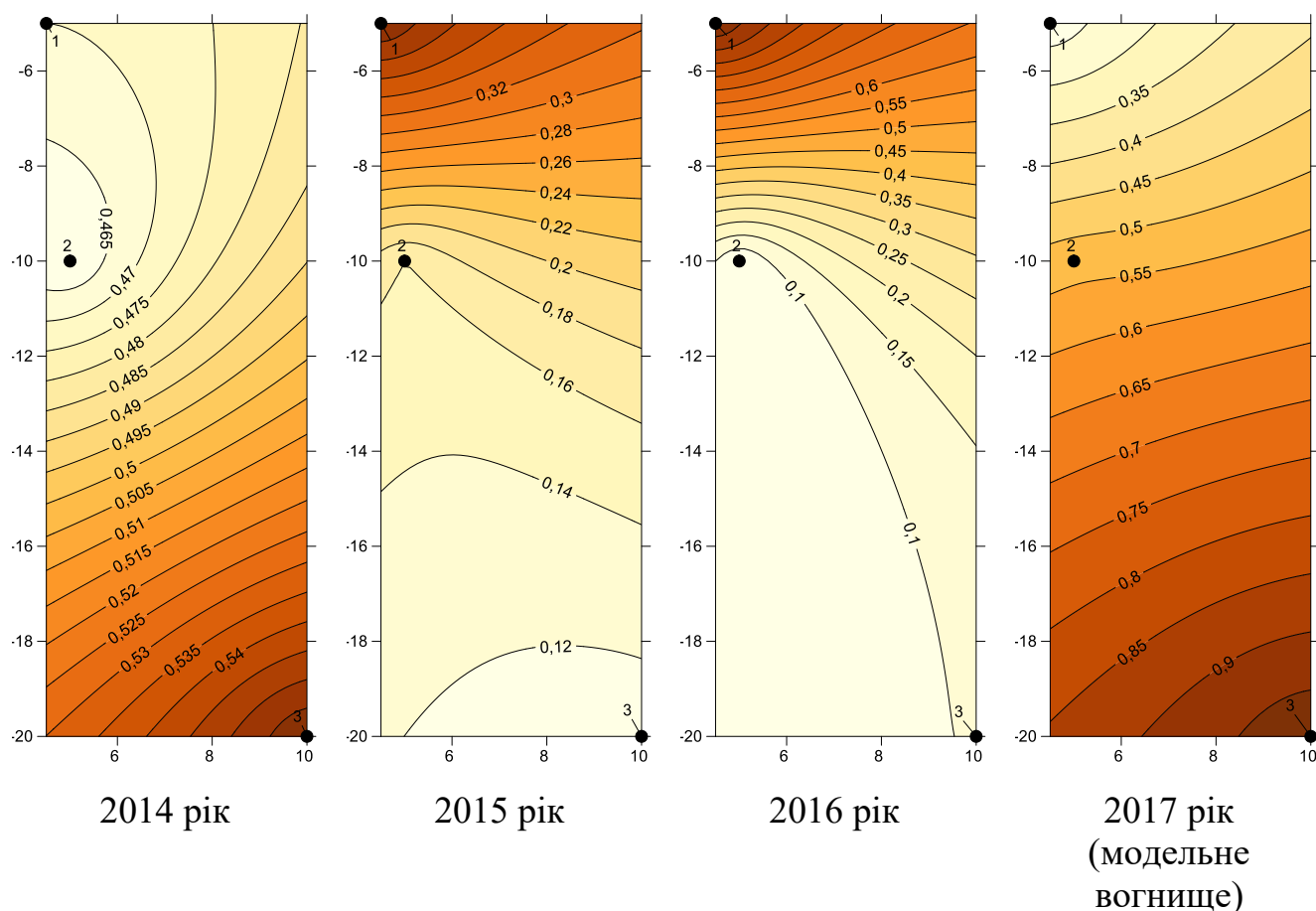


Рисунок 3.20 – Значення Mg для досліджуваних генетичних горизонтів
постпірогенних ґрунтів

Азотне добриво природного походження NO_3 найбільше спостерігається в генетичних горизонтах ґрунту модельного вогнища (5 см – 21,63 мг/кг, 10 см – 9,19 мг/кг, 20 см – 4,41 мг/кг). Це, насамперед, пов'язане із фізико-хімічними процесами обуглювання рослинності у процесі лучної пожежі. Найменші показники притаманні ділянці 3 (5 см – 0,06 мг/кг, 10 см – 0,062 мг/кг, 20 см – 0,03 мг/кг), лучна пожежа на якій відбувалася за 1,5 роки до початку наших експериментальних досліджень.

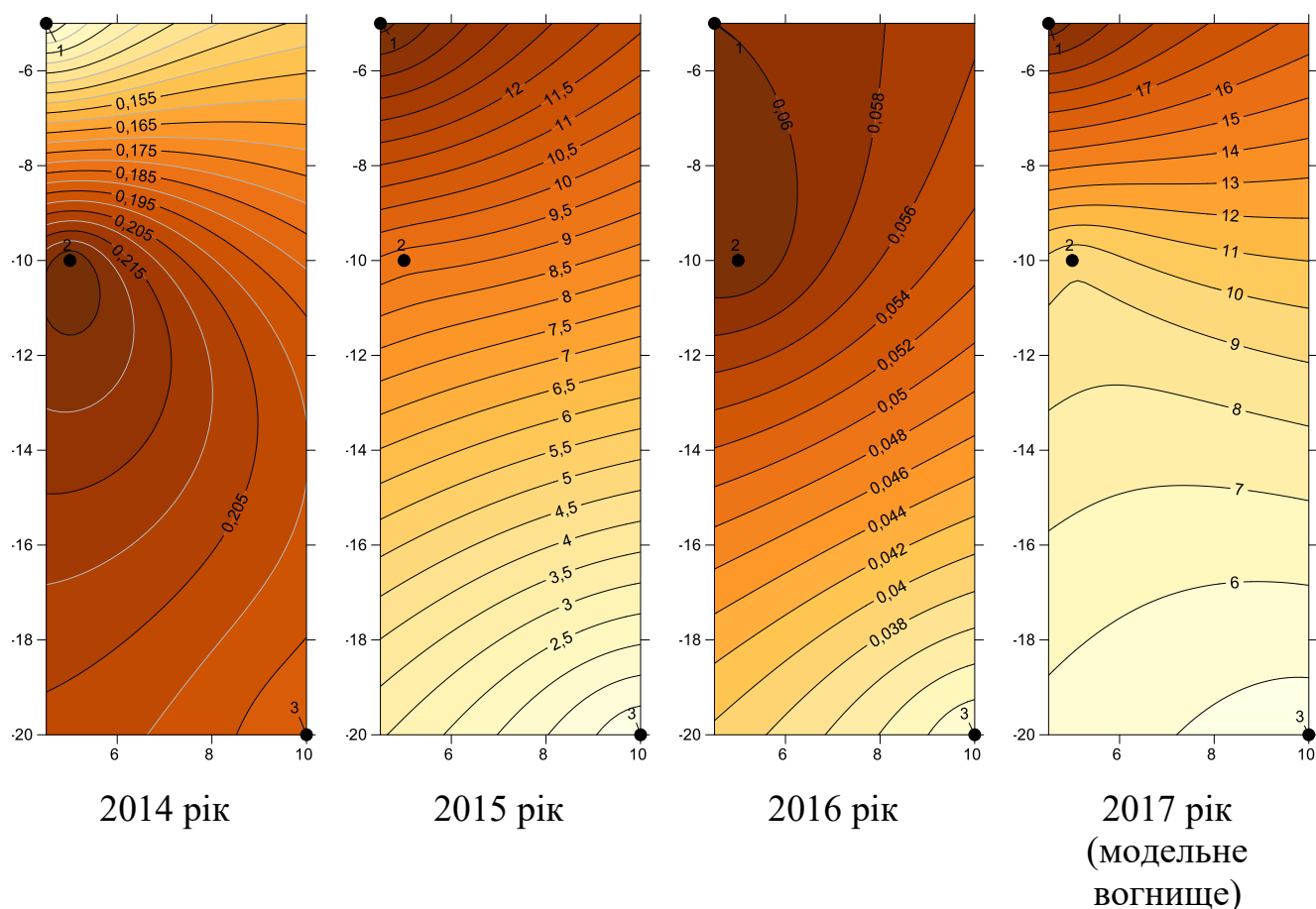


Рисунок 3.21 – Значення NO_3 для досліджуваних генетичних горизонтів
постпірогенних ґрунтів

Найвищі показники P_2O_5 спостерігаються для дослідної ділянки 4 модельного вогнища (5 см – 54,39 мг/кг, 10 см – 35,49 мг/кг, 20 см – 25,41 мг/кг). Найвищі показники – для ділянки 2 (5 см – 10,71 мг/кг, 10 см – 7,98 мг/кг, 20 см – 3,19 мг/кг), на якій за три роки до початку проведення експерименту спостерігалися лучні пожежі.

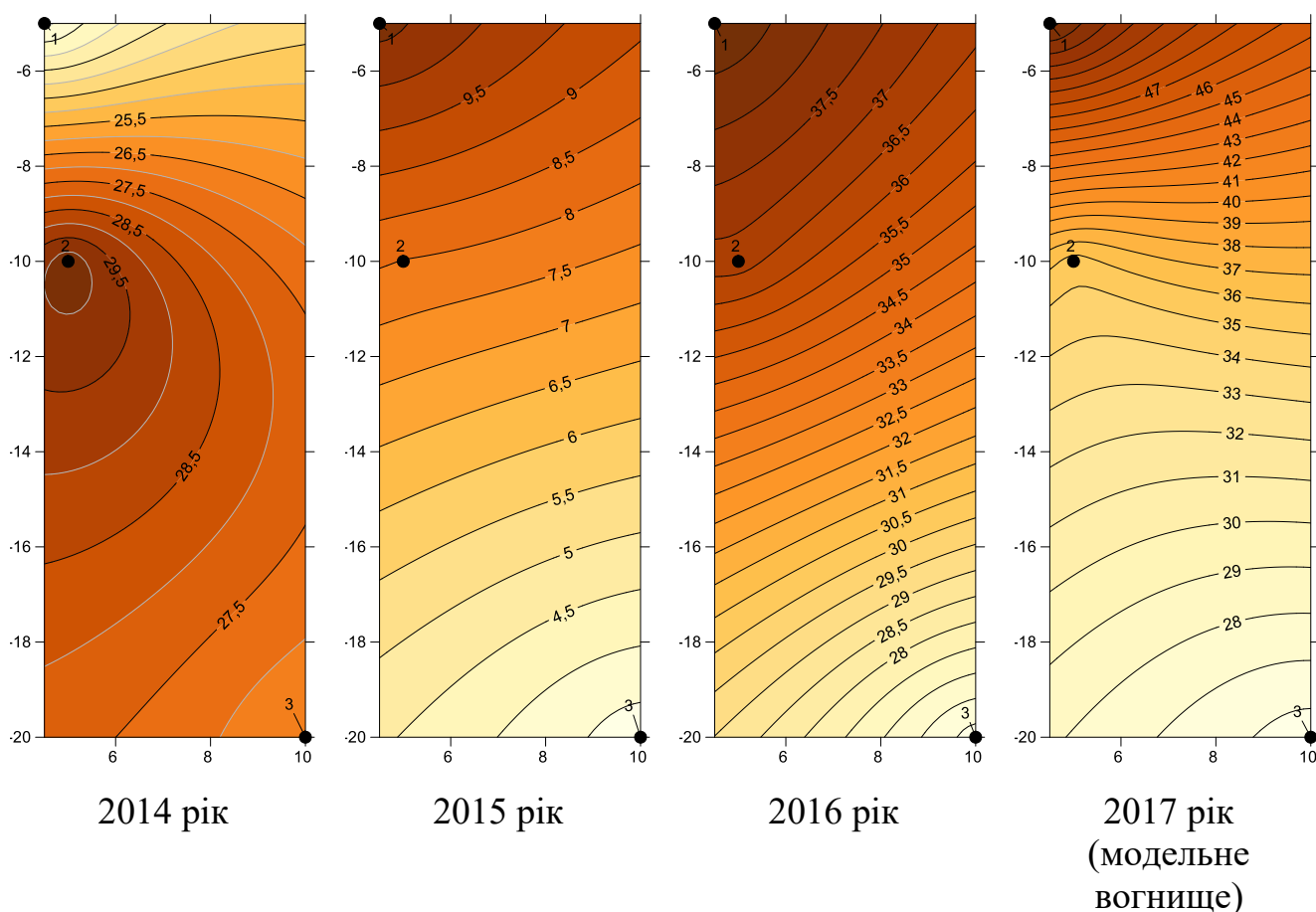


Рисунок 3.22 – Значення P_2O_5 для досліджуваних генетичних горизонтів постпірогенних ґрунтів

Таким чином, дослідивши поширення мінеральних речовин у генетичних горизонтах у залежності від давності виникнення можна констатувати, що лучні пожежі мають безпосередній вплив на їх концентрацію. Найнижчі показники кальцію, магнію, фосфорних, калійних, азотних добрив притаманні досліджуваній ділянці 3, яка потерпала від температурного впливу за 1,5 роки до початку експериментальних досліджень. Найвищі показники концентрації кальцію, магнію, фосфорних, калійних, азотних добрив притаманні досліджуваній ділянці 4, де було штучне вогнище і зразки відбиралися в після пожежний період.

3.5.3. Температурний вплив на міграцію радіонуклідів

Надзвичайно важливими є наукові дослідження, які враховують вивчення міграції радіонуклідів, як у ґрунтах, так і повітрі, поверхневих та підземних водах.

Винятковими такі дослідження стали зокрема після вибуху на Чорнобильській атомній електростанції в Україні у 1986 році. Проведені дослідження [70] в натурних умовах свідчать про те, що вміст радіоактивних часток диму в приземному шарі атмосфери Зони відчуження може різко збільшуватися на декілька порядків через лісові пожежі. Короткочасний (кілька діб) підвищений вміст радіоактивних продуктів згоряння в приземному шарі повітря може досягати рівня значень радіаційної небезпеки для довкілля і безпосередньо для життєдіяльності населення, яке проживає в чистій зоні на значних відстанях (до 30 км по осі сліду) від місця лісової пожежі [70].

Науковці у праці [129] доводять, що особливості ліквідації лісової пожежі в радіаційно забрудненій зоні полягають у виборі способу гасіння, задіянні відповідних сил і засобів, які дають змогу ефективно здійснити локалізацію та ліквідацію пожежі. Окрім традиційних загроз, пов'язаних з виконанням завдань щодо гасіння лісових пожеж, за наявності радіоактивного забруднення додатково слід враховувати чинники небезпеки, пов'язані з радіацією, і застосовувати відповідні засоби захисту. У випадку значних за площею та інтенсивністю пожеж слід застосовувати пожежну авіацію, яка дасть змогу не лише погасити пожежу, а й уникнути безпосереднього контакту пожежників з радіаційно забрудненим середовищем [129].

Зазначено [138], що на забруднених аварійними викидами Чорнобильської АЕС територіях, природна рослинність відіграє роль стабілізатора радіоекологічної ситуації. За стабільних процесів сукцесії винесення речовин за межі ландшафту практично відсутнє і значно зменшує вторинне забруднення прилеглих територій радіонуклідами. Запропоновано методологію і критерії оцінки стану рослинного покриву засобами дистанційного зондування Землі і методами геоінформаційних технологій. Отримано карту просторового розподілу ушкодженої пожежею рослинності, яка містить: типи рослинних угруповань (біоценоз), тип насаджень лісу (хвойний, листяний, мішаний) та трав'янистої рослинності, ступінь ушкодження, їх площу, часові терміни пожежі [138]. Зроблено висновок, що після аварії в зоні відчуження і зоні безумовного

обов'язкового відселення ЧАЕС зміни в рослинному покриві та об'єктах природокористування відбувалися в двох напрямках — деструктивному та поновлювальному. Внаслідок припинення агровиробництва, сільськогосподарські землі: рілля, сіножаті і пасовища, перейшли у категорії перелогів (суходільних луків) та заплавних луків із зміною видового складу рослин. На суходільних луках приурочених до сухіших і бідніших ґрунтів домінують формації костриці червоної (*Festuca rubra*), пирію повзучого (*Elytrigia repens*), тонконогу вузьколистого (*Poa angustifolia*), мітлиці тонкої (*Agrostis capillaris*). До біоценозів, що відповідають низинним заболоченим формам рельєфу входять осоки та водоболотна очеретяна рослинність [138].

Питання вивчення вмісту радіонуклідів у постпірогенних ґрунтах, а також вікову динаміку їх концентрації за генетичними горизонтами розглядалася не у повній мірі. На території Львівського Розточчя такі дослідження не виявлено. З огляду на вищенаведені результати експериментальних досліджень можна зробити заключення, що особливості впливу ландшафтних пожеж на біоту і їх профілактика потребує більш глибоких досліджень.

У результаті вивчення вмісту радіонуклідів в едафічних горизонтах пірологічно трансформованих ґрунтів внаслідок низових пожеж встановлено, що їх питома активність залежить від давності процесів горіння. Встановлено, що найвища питома активність радіонуклідів К 40, Ra 226, Th 232 притаманна досліджуваній ділянці 3, де процеси горіння спостерігалися за 1,5 роки до початку проведення експерименту і досліджуваній ділянці 4 з модельним вогнищем. Зокрема, питома активність К 40 у генетичних горизонтах становила на досліджуваній ділянці 3 – 168-181 Бк/кг, Ra 226 – 9,85-27,3 Бк/кг, Th 232 – 0,8-22,6 Бк/кг. На досліджуваній ділянці 4 питома активність К 40 – 164-192 Бк/кг, Ra 226 – 7,68-11,1 Бк/кг, Th 232 – 1,3-12,8 Бк/кг. На досліджуваних ділянках 1 і 2 значення питомої активності представлених радіонуклідів є значно нижчими. Такі дані свідчать про природне відновлення едафотопів внаслідок ґрунтоутворювальних процесів, які постраждали внаслідок термічної деструкції від лісових пожеж [52].

Дослідженнями встановлено, що найбільша кількість радіонуклідів спостерігається на ділянках із модельним вогнищем та на ділянці №3, де за рік до

початку проведення експериментальних досліджень виникла лучна пожежа. Найбільше виявлено рухому форму К40, концентрація становила 168-192 Бк/кг. Концентрація радону на цих ділянках становила 10,4-27,3 Бк/кг та також є найвищими показниками серед досліджуваних значень.

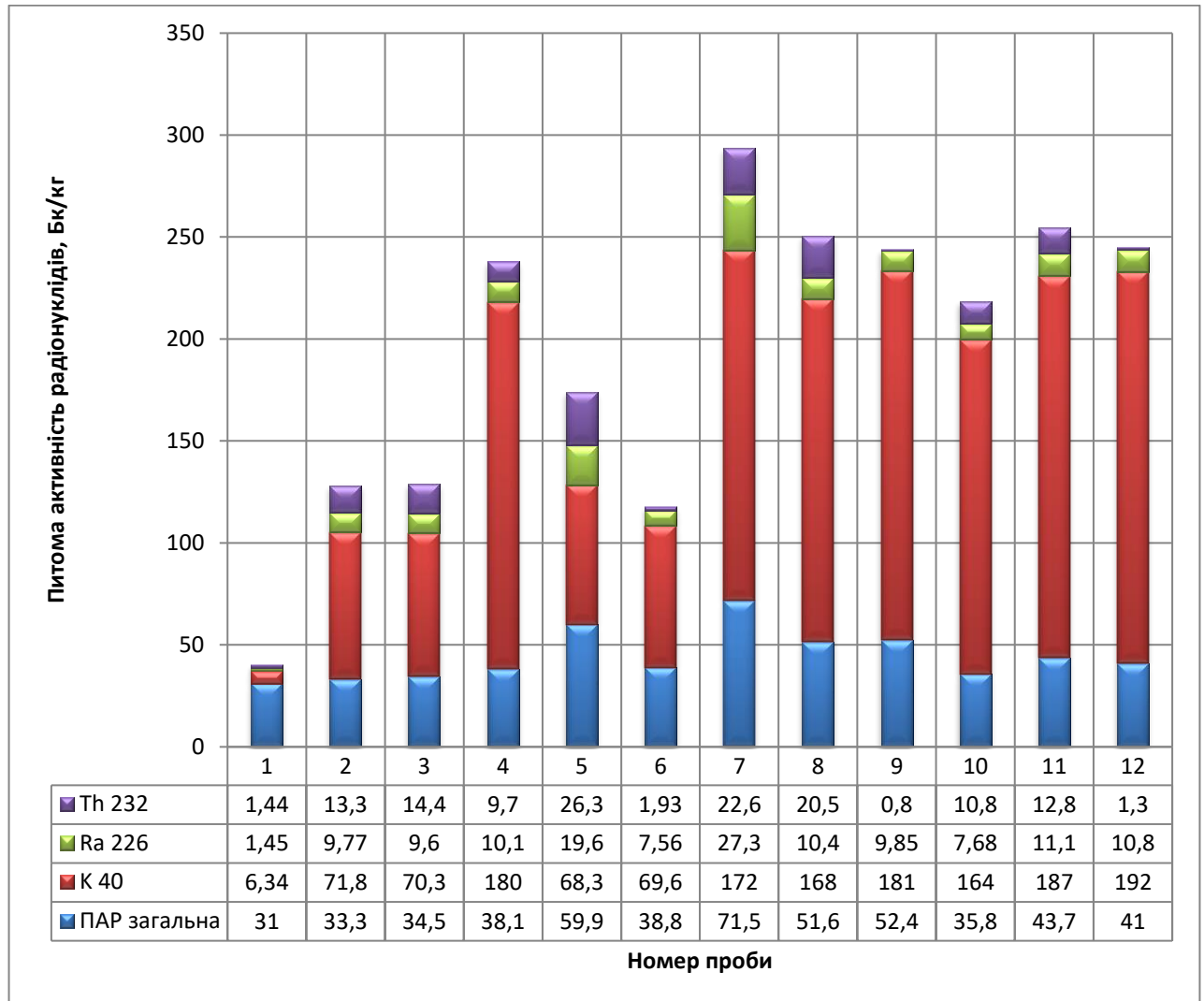


Рисунок 3.23 – Питома активність радіонуклідів у едафічних горизонтах за відібраними пробами, Бк/кг

Максимальні сумарні показники питомої активності радіонуклідів спостерігаються для К 40 та становлять для усіх досліджуваних ділянок і горизонтів 1530,34 Бк/кг. Сумарна питома активність радіонуклідів для Ra 226 становила 135,21 Бк/кг, Th 232 – 135,87 Бк/кг. Відповідно до нормативної документації [145] отримані значення не перевищують мінімально значущі активності (МЗА) радіонуклідів на робочому місці. Проте, підвищена активність

радіонуклідів у ґрунтах має згубний вплив на екологічний стан та розвиток рослинного і тваринного світу.

На рисунку 1.1 зображено сумарні активності радіонуклідів у едафічних горизонтах за відібраними пробами. Встановлено, що у всіх едафічних горизонтах переважає K40.

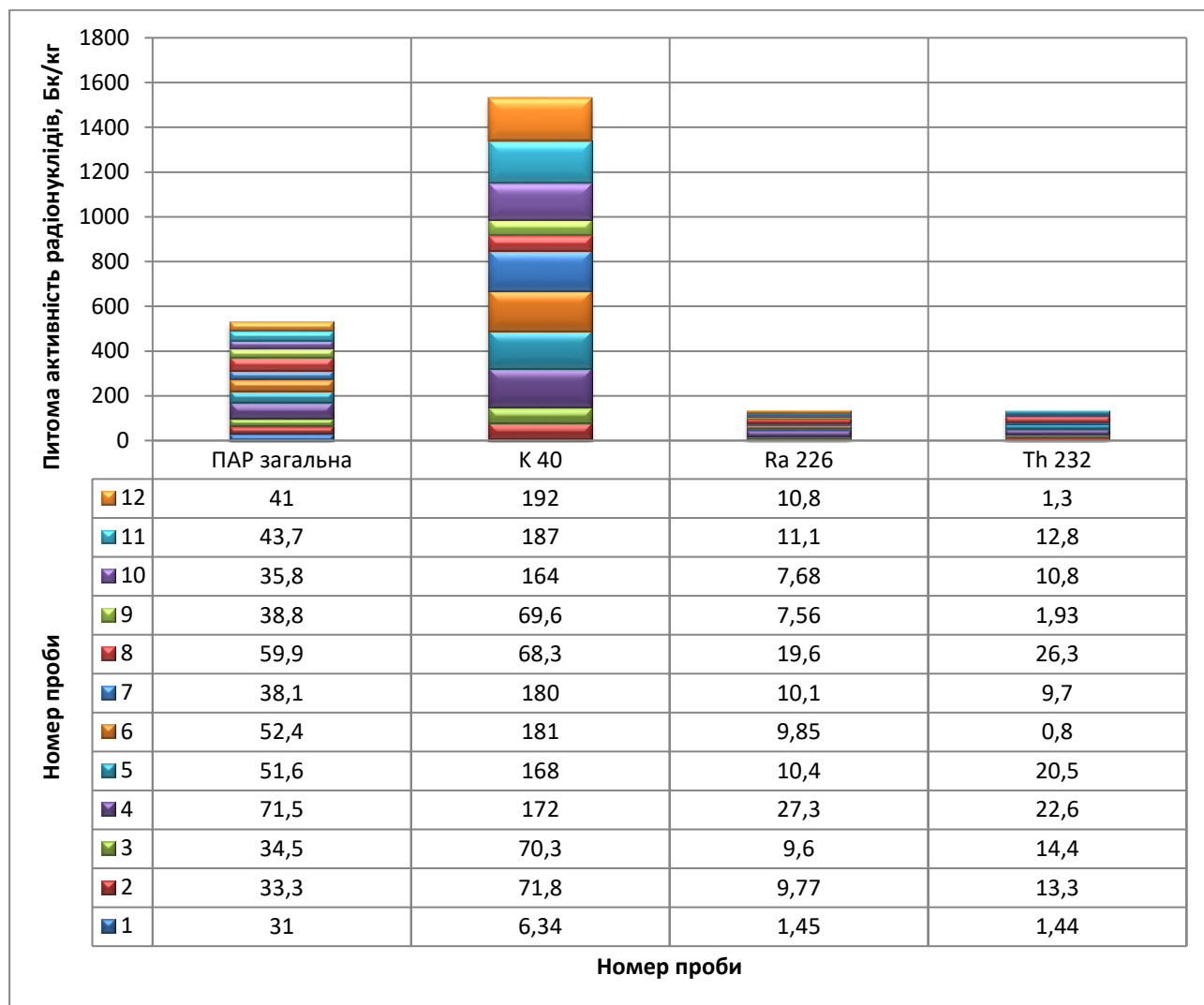


Рисунок 3.24 – Сумарна активність радіонуклідів у едафічних горизонтах, Бк/кг

Розподіл радіонуклідів у едафічних горизонтах наведено на рис. 1.2. Встановлено, що найвища активність радіонуклідів знаходиться в діапазоні 0-50 Бк/кг, а найнижча – 150-200 Бк/кг.

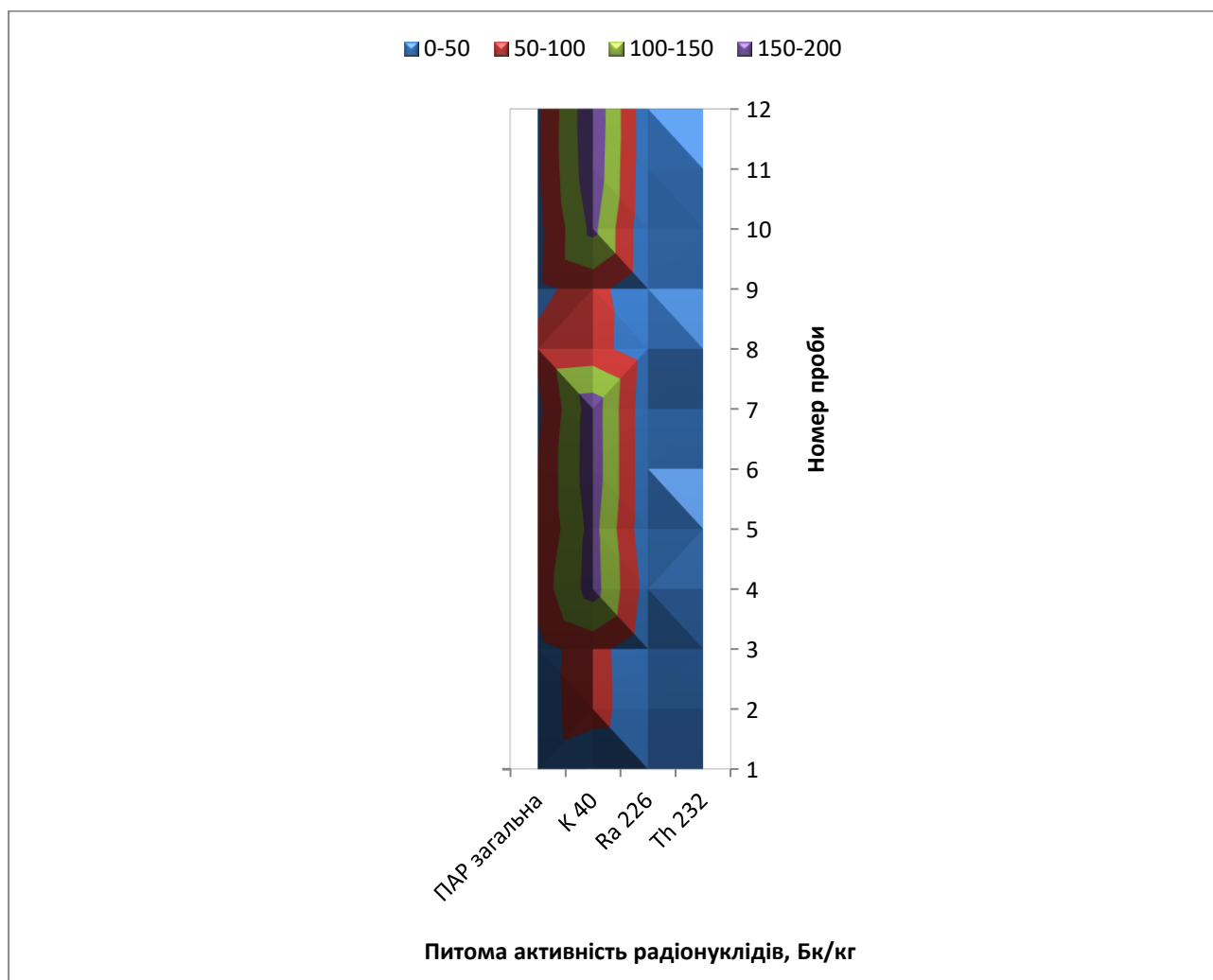


Рисунок 3.25 – Розподіл радіонуклідів у едафічних горизонтах, Бк/кг

Розрахувавши коефіцієнт кореляції Пірсона між різними концентраціями радіонуклідів у едафічних горизонтах встановлено, що на загальну концентрацію найбільше впливає Ra 226 ($K=0,887023$). Також високі показники взаємовпливу мають між собою Ra 226 та Th 232 – коефіцієнт кореляції високий, позитивний ($K=0,71124$). У решта значеннях кореляція практично відсутня (табл. 3.4).

Таблиця 3.4 – Коефіцієнти кореляції Пірсона між різними радіонуклідами у едафічних горизонтах

	ПАР загальна	K 40	Ra 226	Th 232
ПАР загальна		0,370756	0,887023	0,590989
K 40			0,317106	0,034471
Ra 226				0,71124
Th 232				

Потужність еквівалентної дози фотонного іонізуючого випромінювання на місці проведення експерименту становила 0,11 мкЗв/год. та не перевищувала гранично-допустимі концентрації (0,3 мкЗв/год.).

Пожежі у природних екосистемах впливають на питому активність радіонуклідів у залежності від давності низової пожежі. Встановлено, що найвища питома активність радіонуклідів К 40, Ra 226, Th 232 притаманна досліджуваній ділянці, де процеси горіння спостерігалися за 1,5 роки до початку проведення експерименту і досліджуваній ділянці з модельним вогнищем. Зокрема, питома активність К 40 у генетичних горизонтах становила на досліджуваній ділянці 3 – 168-181 Бк/кг, Ra 226 – 9,85-27,3 Бк/кг, Th 232 – 0,8-22,6 Бк/кг. На досліджуваній ділянці 4 питома активність К 40 – 164-192 Бк/кг, Ra 226 – 7,68-11,1 Бк/кг, Th 232 – 1,3-12,8 Бк/кг. Найбільша питома активність радіонуклідів на пірогенно трансформованих ґрунтах знаходиться в діапазоні 0-50 Бк/кг.

Під час настання пожежонебезпечного періоду в природних екосистемах і лісових масивах необхідно виключити необережне поводження із вогнем та спрямовувати профілактичні заходи на інформування населення щодо згубної дії дикого вогню.

3.6. Засоленість постпірогенних ґрунтів

Одним із найбільш небезпечних явищ пожеж у природних екологічних системах є фізико-хімічні та структурні зміни ґрунтів внаслідок температурного (пірогенного) чинника. Зазначимо, що такого роду пожежі, окрім миттєвого знищення біогеоценозу, вторинно впливають на усі компоненти довкілля протягом багатьох років – відновлення екосистеми відбувається повільно, або не відбувається взагалі, змінюються русла річок, формуються нові екотопи, незворотно змінюються фізико-хімічні властивості ґрунтового покриву. Пірогенна деградація едотопів призводить до їх повільного відновлення. В Україні та за кордоном цій проблематиці присвячено багато наукових праць. Всіх

їх можна розділити за такими напрямками: пірогенна деградація торфовищ, фізико-хімічні властивості постпірогенних ґрунтів, пірогенна сукцесія. Серед проведених досліджень слід відмітити наукову працю [73], у якій наводяться дані щодо основних причин пірогенної деградації торфових ґрунтів Рівненської області. Наведено результати польових і лабораторних досліджень, морфологічних особливостей та фізико-хімічних властивостей пірогенних утворень. Охарактеризовано вплив торф'яних пожеж на хімічний склад поверхневих вод. Охарактеризовано особливості заростання пірогенних утворень тощо [73]. Встановлено, що пірогенні утворення після пожежі мають несприятливі фізико-хімічні властивості, зумовлені високою лужністю і карбонатністю поверхневих генетичних горизонтів, низьку щільність будови, а в разі слабого впливу відбувається збільшення частки мінеральної форми фосфору та зменшення частки орґано-мінеральних сполук. Доведено, що торф'яні пожежі вагомо впливають на хімічний склад об'єктів гідросфери поверхневих вод, призводять до появи у воді аномальних концентрацій нітратного азоту, високого рівня концентрацій хлорид- і сульфат- іонів, кальцію і магнію [73].

На основі лабораторних аналізів ґрунтів із ділянок лісу, які постраждали від пожежі, досліджено взаємний зв'язок між лісовими пожежами та ґрунтами. Наведено схему взаємного впливу пожеж і ґрунтів. Встановлено, що внаслідок пожежі вміст поживних речовин у ґрунті (гумусу та більшості мінеральних елементів) знижується, простежено лише зростання вмісту кальцію. Найпомітнішим є вплив пожежі на зниження вмісту магнію та фосфору, а також зольності підстилки. Таку ж залежність простежено і під час окремого огляду ділянок хвойного лісу. Це може свідчити про певне зменшення родючості ґрунтів внаслідок пожежі та початкових процесів ерозії [125].

За результатами досліджень О. С. Бонішко встановлено, що внаслідок спалювання рослинного матеріалу порушується рівновага в рідкій та твердій фазах ґрунту. Автор декларує, що в першу чергу ці зміни виражені в шарі 0-5 см через вигорання рослин та руйнування гумусу. Ґрунт ущільнюється, зменшується кількість обмінних катіонів кальцію та магнію з нагромадженням їх у нижніх

горизонтах та збільшенні необмінного кальцію. В ґрунтовому розчині зростає частка іонів натрію, що призвела до зсуву кислотності в бік нейтралізації кислих розчинів, хоч мінералізація розчину в 1,5 раза зменшилась [74].

Автори [6] доводять, що фізико-хімічні властивості ґрунтів після пожеж погіршуються: вигорає гумус, зменшується вміст нітратного азоту. Лісові низові пожежі різко змінюють морфологічний стан верхньої частини ґрунтового профілю. Змінюється характер поверхневих горизонтів ґрунтів, нерідко формується пірогенний горизонт, який за фізико-хімічними властивостями і вмістом зольних елементів відрізняється від природних аналогів. Під впливом вогню виникають зміни таких властивостей, як: рН, вміст обмінних катіонів, валових і рухомих форм азоту та ін. Концентрація важких металів у поверхневих горизонтах підвищується в декілька разів і перевищує фонові значення внаслідок мінералізації лісової підстилки та трав'янистої рослинності від згорання і подальшої міграції хімічних елементів, що становить екологічну небезпеку. Зроблено висновок [6], що зміна хімічного складу ґрунтів може створювати умови для неможливості існування корінної екогеосистеми, її загибелі і розвитку через певний час іншої модифікованої екогеосистеми.

Вміст гумусу у поверхневому шарі (0-15 см) сірих лісових опідзолених ґрунтів після пройденої низової пожежі знижується через згорання органічних речовин у поверхневому ґрунтовому горизонті. Кислотно-лужна реакція за показником рН у ґрунтах, які зазнали впливу вогню, зміщується до нейтральної, що пояснюється насиченням поглинаючого комплексу ґрунтів лужноземельними елементами [78].

Проведені дослідження [79] показали, що внаслідок впливу пожежі на поверхневий шар ґрунту змінюється вміст гумусу в бік зменшення з 3,4% у ґрунтах КД № 2 до 2,6% у ґрунтах КД №1. На думку автора, це відбувається через згорання органічних речовин у поверхневому ґрунтовому горизонті. у контрольному зразку верхнього прошарку середньодерново-підзолистого ґрунту (КД №2) величина рН становить 4,1. У такому ж ґрунті піддослідної ділянки (КД №1) після проходження пожежі реакція змінюється в бік лужної (рН = 4,8) [79].

У результаті проведених досліджень [116] встановлено, що значно змінився профіль ґрунту, особливо орний (0-30 см) і підорний (30-50 см) шари. На полі, що зазнало пірогенної деградації осушувальна мережа була повністю знищена.

Науковцями у роботі [93] наведено результати спостережень за розвитком рослинності у постпірогенний період на торфовищах. Встановлено, що у процесі пірогенної деградації відбувається практично повне знищення рослинного покриву на поверхні пірогенного утворення. Відразу після пожежі, внаслідок високої лужності середовища, рослинність на пірогенних утвореннях не формується. Наступного року з'являються окремі види рослин-піонерів, які не утворюють суцільного покриву [93]. Спостерігалось, що через 2 роки після пожежі внаслідок зменшення рН та витіснення низькорослих трав високою рослинністю видова різноманітність рослин дещо змінюється, формуючи суцільний густий покрив [93]. Виявлено, що через 5-10 років на пірогенно-перегнійних утвореннях, багатих на перегній та мінеральні речовини, з близьким до поверхні дзеркалом ґрунтових вод рослинний покрив суцільний і досить розвинений, проте його видовий склад бідний і представлений низькоякісними болотними рослинними угрупованнями [93].

Зважаючи на результати вищенаведених та інших досліджень можемо констатувати, що постпірогенні ґрунти потребують детальних досліджень залежно від конкретних природно-кліматичних умов, які, окрім температурного впливу, є визначальними у процесах екологічної ренатуралізації рослинного покриву.

Екологічний моніторинг постпірогенних ґрунтів Українського Розточчя включав вивчення кислотності ґрунтів залежно від давності низової пожежі (рис. 1). Встановлено, що ґрунти на досліджуваних ділянках №2, №3, №4 лужні. На ділянці №1 спостерігаються кислі ґрунти. Причому, найбільші показники лужності ґрунтів ($pH=7,7-7,8$) притаманні ділянці з модельним вогнищем. Кислі ґрунти притаманні найбільш давній ділянці, де протікали низові лісові пожежі (2014 рік). Підтверджується судження [122], що ґрунти давніх згарищ мають значення рН найбільш наближені до фонових.

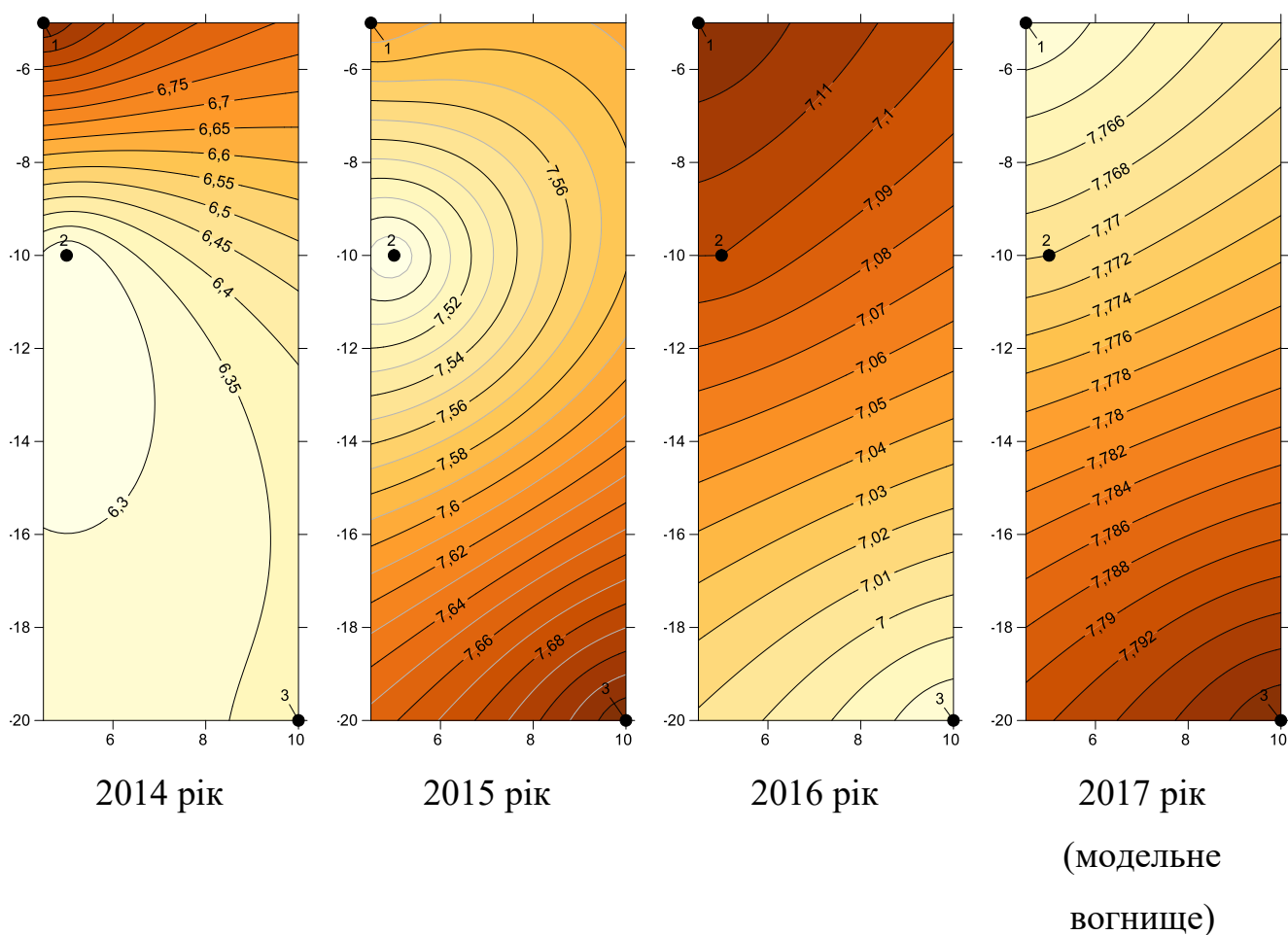


Рисунок 3.26 – Значення рН (водне) для досліджуваних генетичних горизонтів постпірогенних ґрунтів

Зазначимо, що динаміка зростання значень рН у ґрунтах після ландшафтних пожеж пояснюється тим, що зольні водорозчинні сполуки, проникаючи у ґрунт, насичують поглинаючий комплекс лужноземельними елементами і викликають зміщення реакції середовища до нейтрального значення. Низка дослідників декларує, що пожежі сильної інтенсивності, завдяки суттєвому утворенню золи, більше нейтралізують кислоти, ніж слабкі пожежі. Вагомо впливає на показник рН давність протікання лісової (ландшафтної) пожежі [78, 79]. У ґрунтах елювіальних ландшафтів горіння підстилки пришвидшує вилуговування продуктів розкладу [79, 128].

Встановлено, що найбільший вміст водорозчинних солей у горизонтах постпірогенних ґрунтів досліджуваної ділянки №4, а саме: у горизонті 0-5 см – 1964 мг/кг, 5-10 см – 1336 мг/кг, 10-20 см – 1097 мг/кг. Така засоленість

відповідає ділянці, де було відтворене модельне вогнище із температурою полум'я $+700^{\circ}\text{C}$ - $+750^{\circ}\text{C}$. Також високі показники засоленості були притаманні дослідній ділянці №2, низова пожежа на якій проходила за 2 роки до моменту проведення експерименту (рис. 3.27).

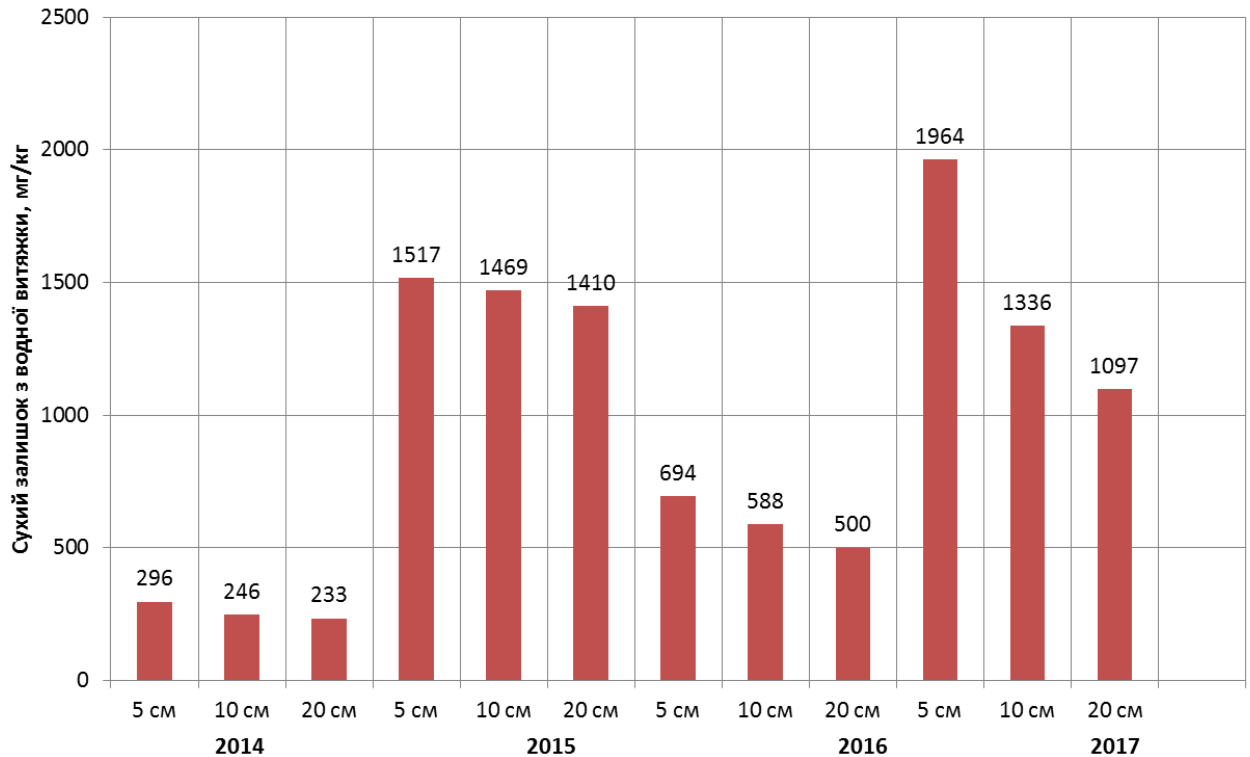


Рисунок 3.27 – Сухий залишок з водної витяжки (вміст водорозчинних солей у горизонтах постпірогенних ґрунтів), мг/кг

У зв'язку із високою засоленістю вищезгаданих ділянок, визначався вміст у пробах хлоридів, сульфатів, фосфатів. Встановлено, що найвищий вміст хлоридів та сульфатів притаманний досліджуваній ділянці №4, а саме: у горизонті 0-5 см вміст хлоридів 432,1 мг/кг, 5-10 см вміст хлоридів 267,1 мг/кг, 10-20 см вміст хлоридів 142,7 мг/кг; у горизонті 0-5 см вміст сульфатів 235,7 мг/кг, 5-10 см вміст сульфатів 160,3 мг/кг, 10-20 см вміст сульфатів 131,7 мг/кг. Надзвичайно високий вміст солей на ділянці із модельним вогнищем свідчить про значне засолювання внаслідок протікання низової пожежі. На решті ділянок рівень концентрації хлоридів та сульфатів значно нижчий залежно від давності низових пожеж, що

свідчить про природне відновлення едафотопів та вирівнювання показників засоленості до фонових значень (рис. 3.28).

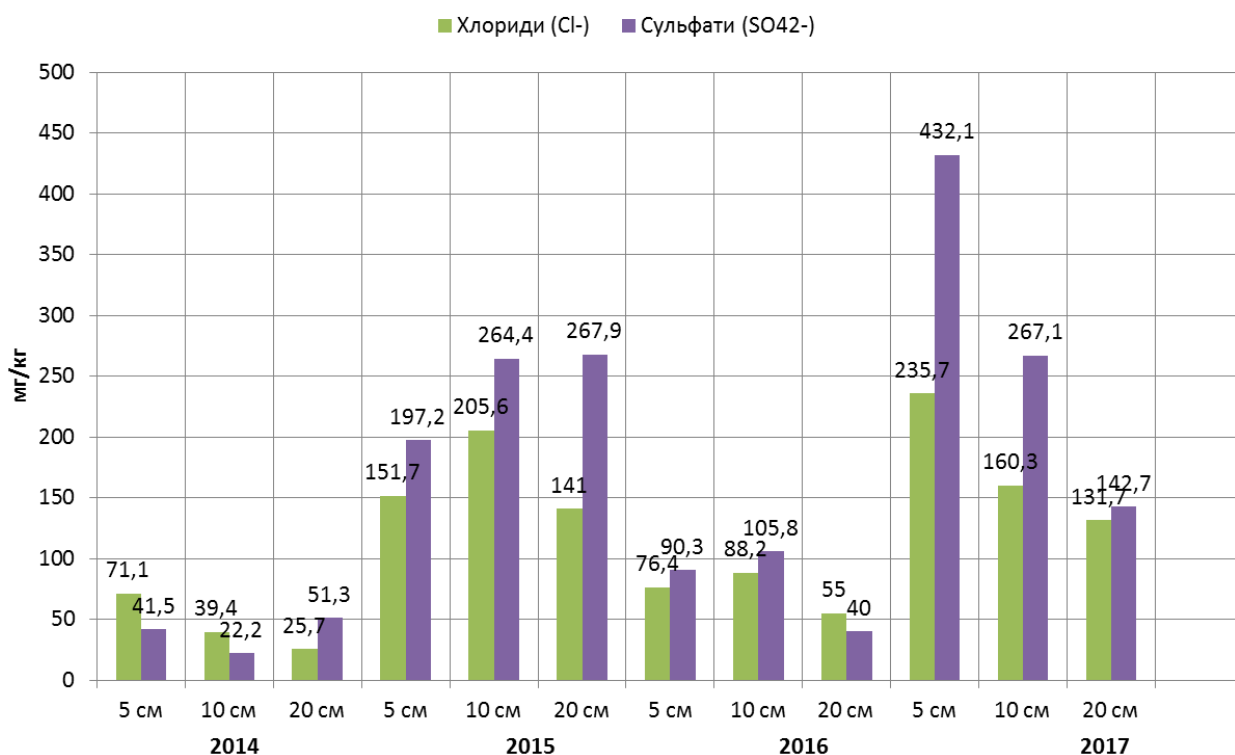


Рисунок 3.28 – Вміст хлоридів та сульфатів у горизонтах постпірогенних ґрунтів, мг/кг

Слід зазначити, що у досліджуваних пробах стандартною методикою фосфати не виявлено.

У результаті проведення дослідження засоленості постпірогенних ґрунтів Українського Розточчя встановлено, що відновлення едафічних показників ґрунту відбувається залежно від давності протікання низових лісових пожеж. Для досліджень кислотності та засоленості ґрунтів прийняли діапазон виникнення низових лісових пожеж 4 роки. Встановлено, що на досліджуваних ділянках, які піддавалися впливу вогню давніше, показники кислотності та засоленості відповідають фоновим значенням та є значно нижчими від тих же значень для модельного вогнища.

3.7. Зміна кислотності ґрунтів внаслідок лучних пожеж

Горіння лучної рослинності супроводжується зміною окисно-кислотних властивостей едафічних горизонтів. Зокрема, на глибині 5 см після проходження фронту лучної пожежі кислотність ґрунту в осередку горіння знизилася до 6,5. При фонових значеннях 7-7,5.

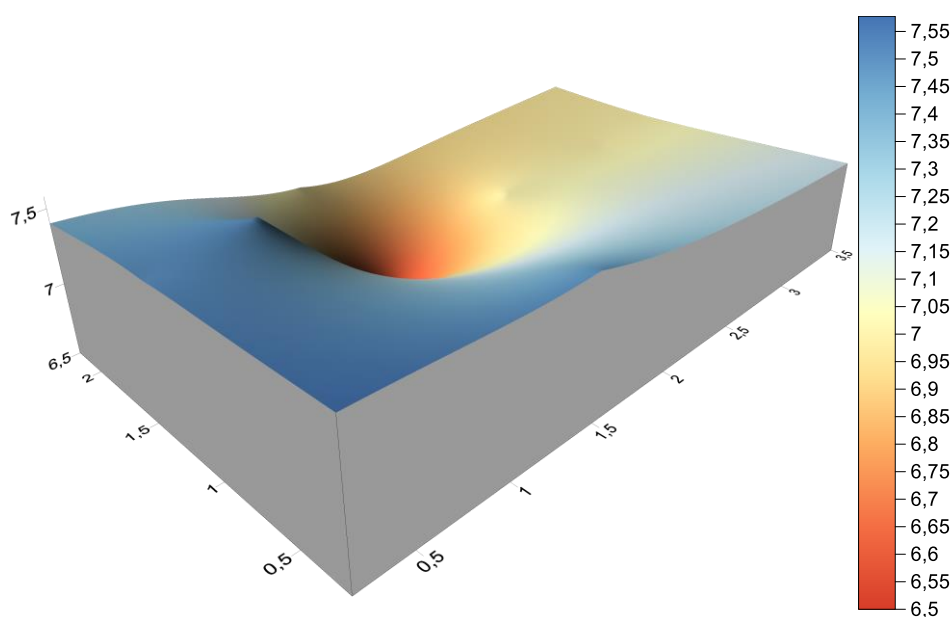


Рисунок 3.29 – 3D моделювання кислотності ґрунту на глибині 5 см після проходження фронту лучної пожежі

На глибині 10 см після проходження фронту лучної пожежі кислотність ґрунту в осередку горіння знизилася до 6,0 та по фронту відбулося значне зниження кислотності едафотопу [189].

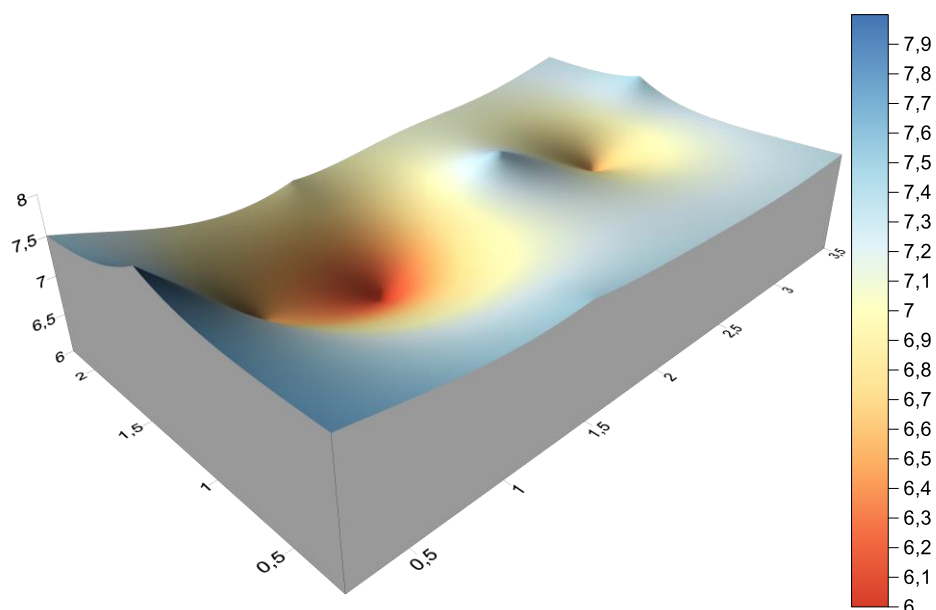


Рисунок 3.30 – 3D моделювання кислотності ґрунту на глибині 10 см після проходження фронту лучної пожежі

На глибині 20 см після проходження фронту лучної пожежі кислотність ґрунту в осередку горіння знизилася до 5,0 та по фронту відбулося значне зниження кислотності едафотопу в діапазоні 5,0-5,2.

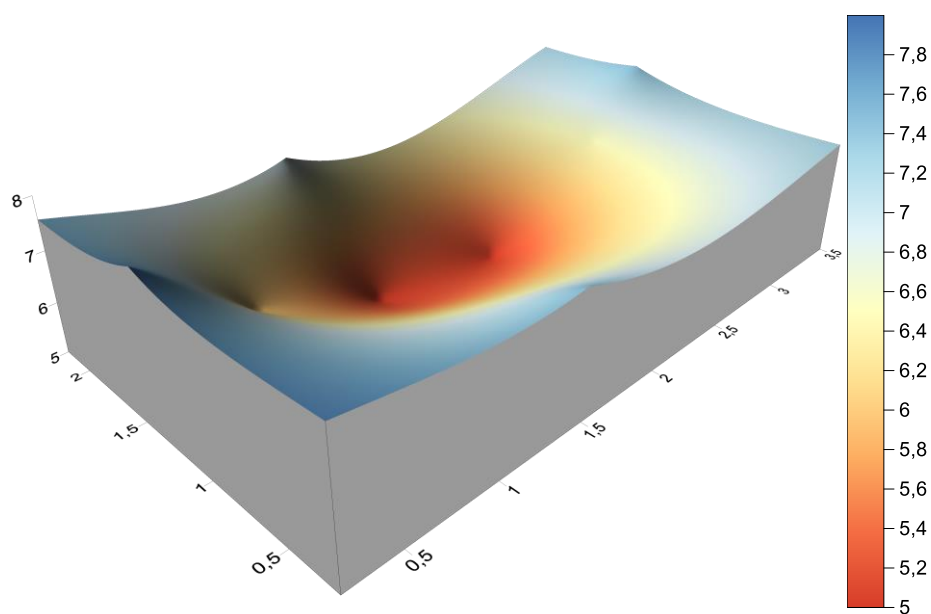


Рисунок 3.31 – 3D моделювання кислотності ґрунту на глибині 20 см після проходження фронту лучної пожежі

Таким чином, температурний вплив лучних пожеж має вагоме значення для окисно-відновних властивостей едафічних горизонтів у напрямі зниження значень їх кислотності до 5,0.

3.8. Висновки до Розділу 3

1. Довжина хвиль променевого теплообміну під час горіння лучної рослинності на відкритому просторі знаходиться в діапазоні 2,9 - 5,3 мкм, що відповідає інфрачервоному (тепловому випромінюванню). Моніторинг температури субстрату під час лучних пожеж з точки зору післяпожежного фітомеліоративного відновлення порушених територій є важливими. Фізико-хімічні властивості мінералізованого шару, який зазнав температурного впливу лучних пожеж, змінюються з точки зору зниження врожайності та згоряння поживних речовин.
2. Ландшафтні пожежі спричиняють значне техногенне навантаження на всі компоненти біосфери. Під час проведення досліджень встановлено, що температура полум'я під час горіння лучної рослинності в початковий момент часу становила $+66,7^{\circ}\text{C}$. У процесі горіння, через 20 секунд, температура полум'я сягнула $+352,5^{\circ}\text{C}$, максимальною температура полум'я була $+715,7^{\circ}\text{C}$ після вигорання всього горючого матеріалу (через 2,5 хв після початку дослідів).
3. Потужність еквівалентної дози фотонного іонізуючого випромінювання у місцях горіння лучної рослинності становила 0,11 мкЗв/год. та не перевищувала гранично-допустимі концентрації (0,3 мкЗв/год.). Встановлено, що найвища питома активність радіонуклідів K 40, Ra 226, Th 232 притаманна досліджуваній ділянці, де процеси горіння спостерігалися за 1,5 роки до початку проведення експерименту і досліджуваній ділянці з модельним вогнищем.
4. Під час вивчення впливу низових лісових пожеж на концентрацію рухомих форм важких металів у різних ґрунтових генетичних горизонтах встановлено, що

найвища концентрація спостерігається у верхніх шарах, окрім ділянки, яка зазнала давнього пірогенного впливу (за 3,5 роки до початку проведення моніторингу). Тобто, екологічне відновлення території відбувається на 3-4 рік після пірогенного чинника.

5. Встановлено, що на досліджуваних ділянках, які піддавалися впливу вогню давніше, показники кислотності та засоленості відповідають фоновим значенням та є значно нижчими від тих же значень для модельного вогнища.

6. У трьох випадках (ділянки яких відповідають найвищим температурам полум'я, >940 K), розрахована густина теплового потоку є значно вищою табличного значення критичної густини теплового потоку для досліджуваного матеріалу $q_{кр}$. Така ситуація потребує влаштування протипожежних бар'єрів та розробки низки пожежно-профілактичних заходів щодо недопущення лучних пожеж (запобігання спалювання сухої трави, стерні, навмисних підпалів тощо).

7. Враховуючи вихідні умови, параметри навколишнього середовища та фізико-хімічні характеристики горючого матеріалу встановлено, що пожежа трави та осередків трави у вигляді стогів тривала понад 60 с, не зважаючи на заданий час моделювання — 180 с. Програмне середовище WFDS надало можливість встановити деякі параметри пожежонебезпечності, зокрема температури полум'я та потужності тепловиділення від пожежі.

РОЗДІЛ 4. ПРОТИПОЖЕЖНА ПРОФІЛАКТИКА ТА ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ТА ЛІКВІДАЦІЇ ЛУЧНИХ ПОЖЕЖ

4.1. Особливості прогнозування пожеж у природних екосистемах

Прогнозування пожежної небезпеки природних екосистем є найбільш актуальною і до кінця не вирішеною задачею вчених, які займаються дослідженнями такого роду пожеж. Однією із найбільш поширених методик прогнозування пожеж в природних екосистемах є розрахунок комплексного показника пожежної небезпеки. Для прогнозування пожеж у природних екосистемах для досліджуваного регіону, розрахуємо комплексний показник пожежної небезпеки за місяць липень 2021 року (найсспекотніший місяць) за залежністю [123]:

$$K = \sum_I^n t^0 (t^0 - \alpha), \quad (4.1)$$

де, t^0 - температура повітря;

α - температура точки роси;

n – кількість днів без дощу.

Розрахувавши комплексний показник пожежної небезпеки можна визначити клас пожежної небезпеки (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Визначення пожежної небезпеки в лісі за умовами погоди

Комплексний показник	Клас пожежної небезпеки	Пожежна небезпека
<300	I	Немає
301 - 1000	II	Незначна
1001 - 4000	III	Середня
4001 - 10000	IV	Висока
10000 - 12000	V	Надзвичайна

Температуру повітря та вологість отримано з офіційних довідникових джерел із відкритим доступом, точку роси перераховано [<https://world-weather.ru/pogoda/ukraine/iviv/july-2021/>] (табл. 4.2).

Таблиця 4.2 – Розрахунок комплексного показника пожежної небезпеки та класу пожежної небезпеки у м. Львів в липні 2021 року

Дата	t^o повітря в 12^{oo}	Точка роси 12^{oo} α	Комплексний показник за добу $t^o (t^o - \alpha)$	Опади за добу, мм	ΣK	Клас пожежної небезпеки
1	2	3	4	5	6	7
01.07	22	17	110	3	110	I
02.07	21	15	126	4	126	I
03.07	16	13	48	5	48	I
04.07	19	17	38	3	38	I
05.07	24	16	192	-	230	I
06.07	26	19	182	3	412	II
07.07	28	19	252	-	664	II
08.07	29	19	290	-	954	II
09.07	29	19	290	-	1244	III
10.07	26	19	182	-	1426	III
11.07	28	16	336	-	1762	III
12.07	30	15	450	-	2212	III
13.07	30	16	420	-	2632	III
14.07	33	19	462	-	3094	III
15.07	32	23	288	-	3382	III
16.07	28	18	280	-	3662	III
17.07	30	18	360	-	4022	IV
18.07	28	20	224	-	4246	IV
19.07	23	19	92	4	92	I
20.07	19	17	38	-	130	I
21.07	20	12	160	3	290	I
22.07	21	13	168	3	458	II
23.07	23	14	207	-	665	II
24.07	25	16	225	-	890	II
25.07	27	18	243	3	1133	III
26.07	28	20	224	3	1357	III
27.07	29	21	232	-	1589	III
28.07	29	21	232	-	1821	III
29.07	24	15	216	-	2037	III
30.07	28	15	364	-	2401	III
31.07	28	19	252	-	2653	III

Зазначимо, що на досліджуваній території у липні 2021 року спостерігалася підвищена пожежна небезпека природних екосистем. Дані комплексного показника за добу і днями у місяці липні 2021 року наведено на рис. 4.1.

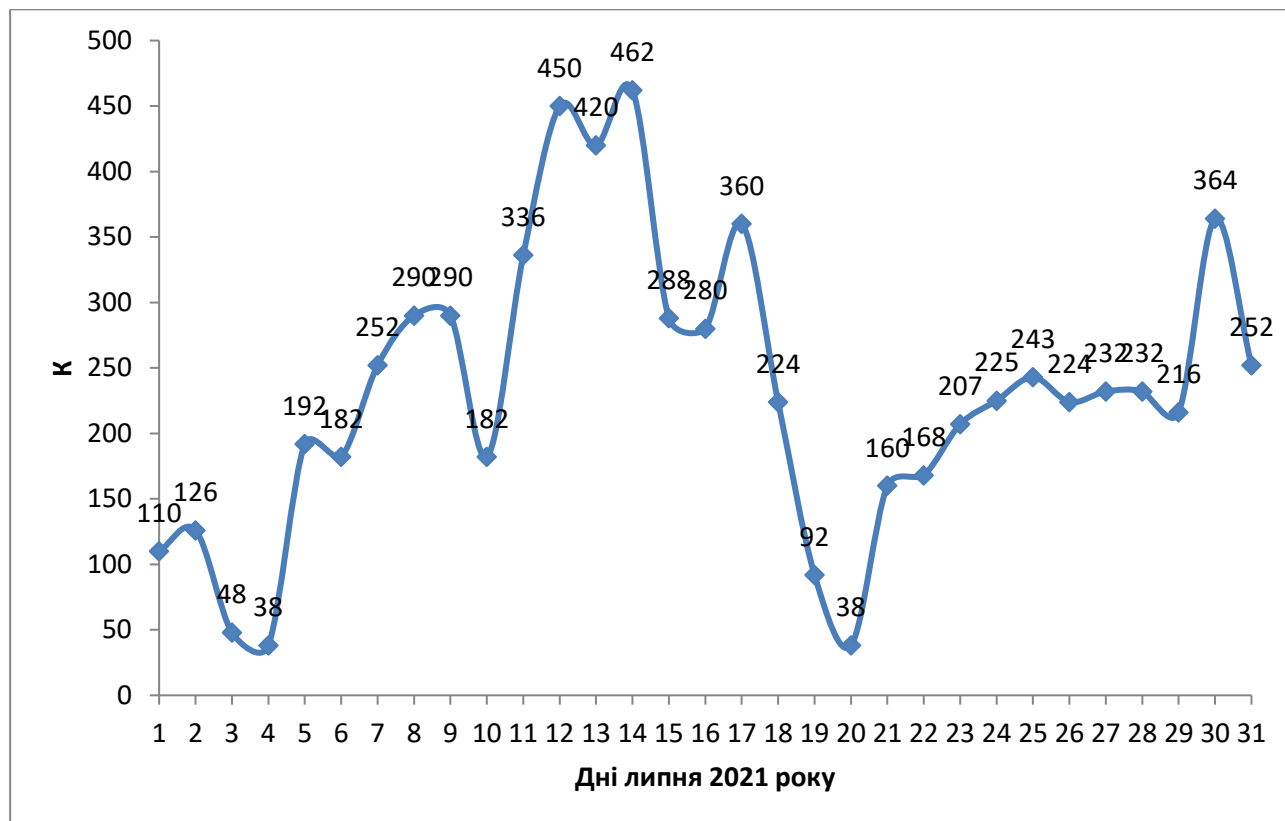


Рисунок 4.1 – Добовий комплексний показник у місяці липні 2021 року

Розрахувавши комплексний показник пожежної небезпеки встановлено, що у липні 2021 року 48% днів належали до III класу пожежної небезпеки, 19% - до II класу, 7% - до IV класу і лише 26% - до I класу (рис. 4.2).

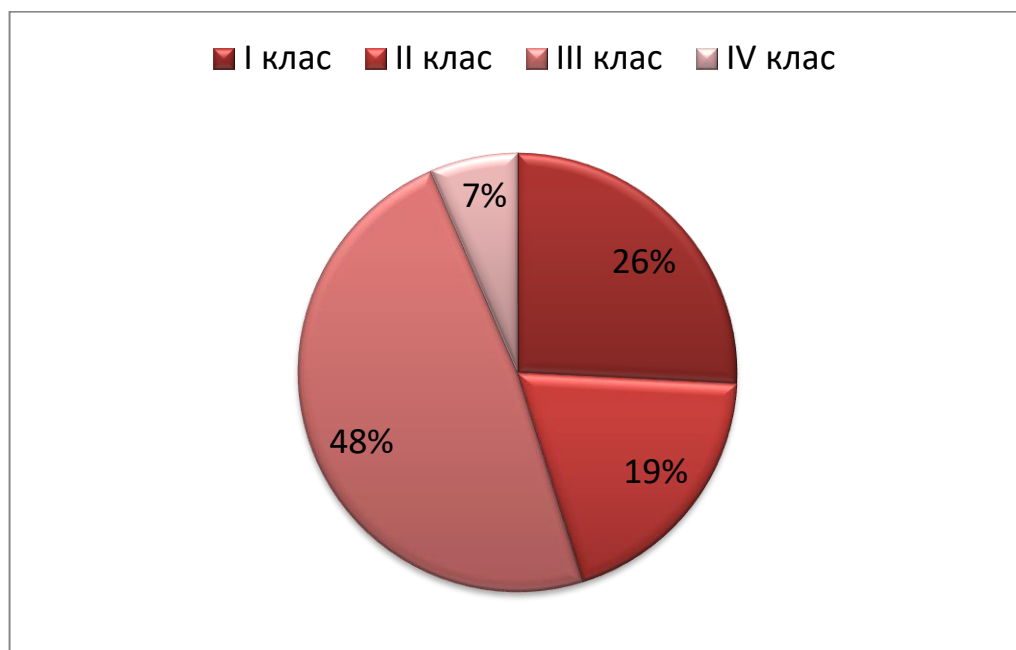


Рисунок 4.2 – Розподіл днів у липні 2021 року за класами пожежної небезпеки

Для уточнення теоретичних розрахунків прогнозування пожежної небезпеки в природних екосистемах у Львівському державному університеті безпеки життєдіяльності ДСНС України в 2018 році розроблено «Прилад для визначення пожежної небезпеки в лісових масивах та природних екосистемах за умовами погоди». Завдяки використанню у пристрої автономного джерела живлення його можна застосовувати на ділянках з відсутнім електроживленням. Застосування в пристрої елементів, які можуть витримувати підвищені температуру та вологість дає змогу працювати не зазнаючи суттєвих його деформацій і зберігаючи не лише стабільність форми, але й експлуатаційні характеристики, що забезпечуватиме надійність та тривалу експлуатацію пристрою у використанні. Пристрій є компактним та може використовуватись для експериментальних досліджень безпосередньо в польових умовах.



Рисунок 4.3 – Прилад для визначення пожежної небезпеки в лісових масивах та природних екосистемах за умовами погоди: 1 – рама для кріплення елементів; 2 – металева сітка; 3 – дерев’яні бруски; 4 – вологомір деревини; 5 – металева лінійка (автори Попович В.В., Волощишин А.І., Гапало А.І., 2018 р.)

Визначення пожежної небезпеки в лісових масивах та природних екосистемах за умовами погоди здійснюється наступним чином. У піднаметовому просторі досліджуваного лісового масиву встановлюють прилад для визначення пожежної небезпеки в лісових масивах за умовами погоди. На металеву сітку 2 приладу розкладають дерев’яні бруски 3 розміром 2,2х1,2х45 см для хвойних і 6х0,3х45 см – для листяних порід на висоті 10-25 см над поверхнею підстилки. Висоту встановлення приладу регулюють за допомогою металевої лінійки 5. Дерев’яні бруски висушують до повітряно-сухого стану. Щодня о 16.00 год. за допомогою вологоміру 4 вимірюють вологість дерев’яних брусків. Встановивши вологість дерев’яних брусків за допомогою вологоміру 4 порівнюють значення вологості із показниками ймовірності загоряння лісових горючих матеріалів, які наведені у таблиці 3.9.

Таблиця 4.3 – Співвідношення вологості дерев'яних брусків із ймовірністю загорання лісових горючих матеріалів

Відносна вологість дерев'яних брусків, %	>25	19-25	14-18	11-13	8-10	2-7
Ймовірність загорання	Відсутня	Дуже низька	Низька	Середня	Висока	Дуже висока

Технічний результат досягається миттєвою та точною передачею числових значень вологості брусків на екран вологоміру, що дозволяє, порівнявши їх із шкалою ймовірності загорання лісових горючих матеріалів, встановити пожежну небезпеку в лісових масивах за умовами погоди. Провівши вимірювання вологості брусків влітку 2021 року нами було встановлено співвідносність із розрахунками комплексного показника пожежної небезпеки (рис. 4.4).

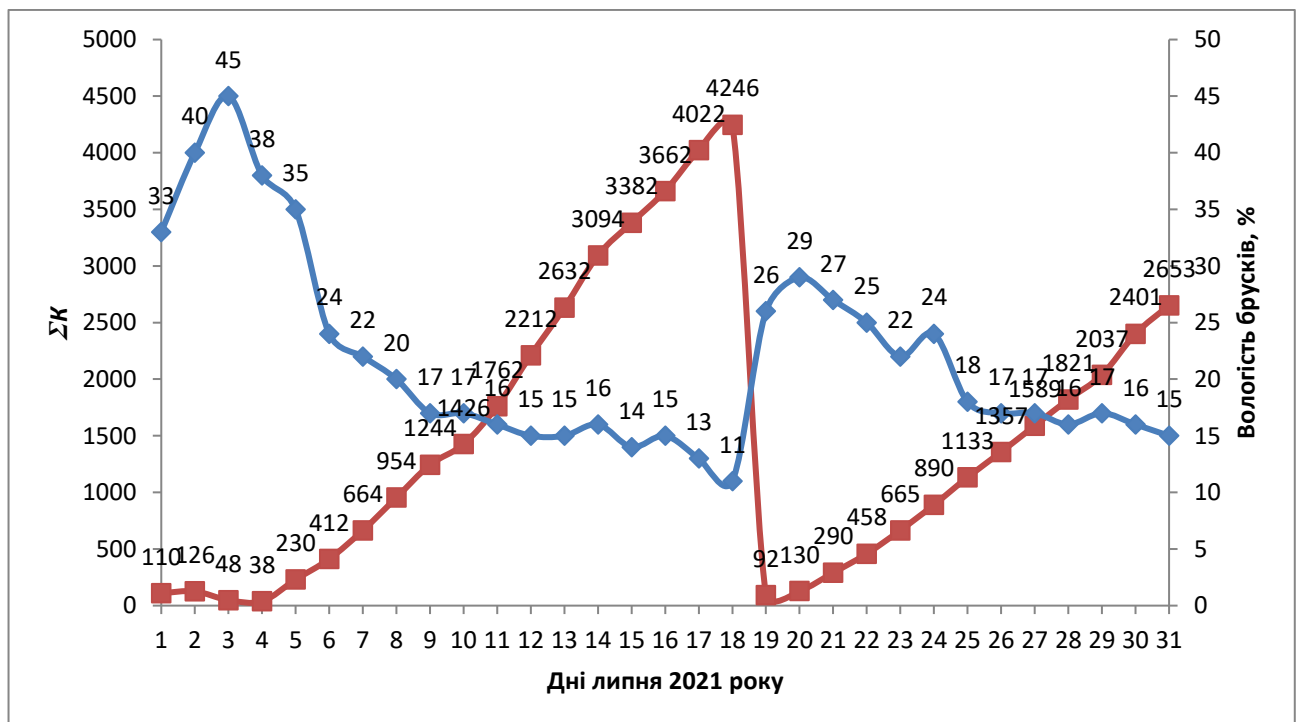


Рисунок 4.4 – Співвідношення комплексного показника пожежної небезпеки із показниками вологості брусків «Приладу для визначення пожежної небезпеки в лісових масивах та природних екосистемах за умовами погоди»

Встановлено, що коефіцієнт кореляції між значеннями комплексного показника пожежної небезпеки із показниками вологості брусків «Приладу для визначення пожежної небезпеки в лісових масивах та природних екосистемах за умовами погоди» високий від'ємний та становить -0,7914. Тобто, при збільшенні комплексного показника – вологість знижується. Отже, розроблений прилад можна використовувати для прогнозування пожежної небезпеки в лісових масивах та природних екосистемах.

4.2. Розрахунок протипожежних бар'єрів у вигляді мінералізованих смуг

Оскільки лучні пожежі у весняний та осінній періоди є частим явищем поблизу сільськогосподарських угідь, лісових масивів, викликає наукову цікавість процеси теплообміну між ділянками та умови, які цьому перешкоджають.

Для обмеження поширення вогню під час лучних пожеж слід влаштовувати протипожежні бар'єри (розриви). Протипожежний бар'єр – ділянка території, яка перешкоджає розповсюдженню і розвитку лісових пожеж (мінералізовані смуги, протипожежні розриви, протипожежні заслони, пожежостійкі узлісся, протипожежні канави, ріки, озера, автомобільні дороги тощо) [83].

Ширину протипожежного бар'єру розраховують за формулою:

$$l = R\sqrt{F_n}, \quad (4.2)$$

де, l – ширина протипожежного бар'єру, м;

R – поправочний коефіцієнт;

F_n – площа полум'я, м².

Коефіцієнт R визначається за формулою:

$$R = \sqrt{\frac{E}{\pi q_{кр}}}, \quad (4.3)$$

де, E – випромінювальна здатність абсолютно сірого тіла, Вт/м²;

$q_{кр}$ – критична густина теплового потоку для досліджуваного матеріалу Вт/м².

Площа полум'я визначається за формулою:

$$F_n = hb, \quad (4.4)$$

де, h – висота полум'я, м;

b – глибина полум'я, м.

Таблиця 4.4 – Розраховані дані ширини протипожежного бар'єру (мінералізованої смуги)

№	E , Вт/м ²	$q_{кр}$, Вт/м ² (табл.)	h , м	b , м	F_n , м ²	R	l , м
1	4588,2	7450	1,6	1	1,6	0,44	0,56
2	41694,6	15400	1,6	1	1,6	0,93	1,18
3	45656,8	15400	1,6	1	1,6	0,97	1,23
4	49622,2	15400	1,6	1	1,6	1,01	1,28
5	16749	13300	1,6	1	1,6	0,63	0,80
6	9361,4	7450	1,6	1	1,6	0,63	0,80
7	4492	7450	1,6	1	1,6	0,44	0,56
8	9517,7	7450	1,6	1	1,6	0,64	0,81

Таким чином, мінімальна ширина протипожежного бар'єру (мінералізованої смуги) для обмеження поширення лучних пожеж, за даними наших розрахунків, становить 0,56 м, максимальна – 1,28 м.

Під час локалізації лучних пожеж способом створення протипожежних бар'єрів на шляху розповсюдження полум'я, відстань від фронту пожежі до місця створення перешкоди можна визначити за залежністю:

$$L = (v_l^\phi + v_l^m)\tau + l, \quad (4.5)$$

де, v_l^ϕ – лінійна швидкість лучної пожежі по фронту, м/год;

v_l^m – лінійна швидкість лучної пожежі по тилу, м/год;

τ – час вільного розвитку пожежі (з моменту виявлення до моменту введення сил та засобів), год.;

l – ширина протипожежного бар'єру, м.

Час вільного розвитку пожежі τ визначається за формулою:

$$\tau = \tau_{зб} + \tau_{сл} + \tau_{ор} + \tau_{загор}, \quad (4.6)$$

де, $\tau_{зб}$ – час збору особового складу пожежно-рятувального підрозділу, год.;

$\tau_{сл}$ – час слідування особового складу пожежно-рятувального підрозділу на пожежно-рятувальному автомобілі до місця лучної пожежі, год.;

$\tau_{ор}$ – час оперативного розгортання пожежно-рятувального підрозділу, год.;

$\tau_{загор}$ – час прокладання загороджувальної смуги (для лучних пожеж приймається 80 люд./хв за умови ширини прокладки до 0,5 м ручними знаряддями), год.

У нашому випадку лінійна швидкість лучної пожежі по фронту становить 2 м/хв (120 м/год), лінійна швидкість лучної пожежі по тилу – 1 м/хв (60 м/год).

У нашому випадку час вільного розвитку пожежі τ становить:

$$\tau = \tau_{зб} + \tau_{сл} + \tau_{ор} + \tau_{загор} = 0,016 + 0,2 + 0,033 + 1,33 = 1,58 \text{ год.} \quad (4.7)$$

де, $\tau_{зб} = 0,016$ год. (1 хв.);

$\tau_{сл} = L_1/v = 12/60 = 0,2$ год. (12 хв.), де $L_1 = 12$ км (відстань від 48 Державного пожежно-рятувального поста м. Рава-Руська до с. Лавриків, де проводився експеримент); $v = 60$ км/год. – середня швидкість руху АЦ-40(131)137А до місця виклику;

$\tau_{ор} = 0,033$ год. (2 хв.);

$\tau_{загор}$ – час прокладання загороджувальної смуги (для лучних пожеж приймається 80 люд./хв (1,33 люд./год.) за умови ширини прокладки до 0,5 м ручними знаряддями), год.

Результати розрахунків відстані від фронту лучної пожежі до місця створення перешкоди за залежністю 4.2 наведені у таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Відстані від фронту лучної пожежі до місця створення перешкоди на досліджуваних ділянках

№	l , м	L , м
1	0,56	284,96
2	1,18	285,58
3	1,23	285,63
4	1,28	285,68
5	0,80	285,2
6	0,80	285,2
7	0,56	284,96
8	0,81	285,21

Таким чином, відстань від фронту лучної пожежі до місця створення перешкоди повинна становити ≥ 286 м з метою безпеки особового складу пожежників.

Дальність розлітання іскор та продуктів піролізу від осередку горіння лучної рослинності, які здатні викликати займання визначається за формулою (за умови швидкості вітру $v_6 \leq 9$ м/с):

$$l_p = \frac{14,7 S_n v_6}{v_{турб}^3}, \quad (4.8)$$

де, S_n – площа лучної пожежі, м²;

v_6 – швидкість вітру, м/с;

$v_{турб}^3$ – турбулентна швидкість вітру під час лучної пожежі, м/с (приймається у розрахунках $v_{турб}^3 = 9$ м/с).

У нашому випадку площа лучної пожежі приймається 3000 м², за швидкості вітру 1 м/с, 5 м/с, 15 м/с. Розрахунки дальності розлітання іскор та продуктів піролізу від осередку горіння лучної рослинності наведені в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Дальність розлітання іскор та продуктів піролізу від осередку горіння лучної рослинності

$v_{\text{в}}, \text{ м/с}$	$l_p, \text{ м}$
1	60,5
5	302,5
15	907,4

Встановлено, що при збільшенні швидкості вітру від 1 м/с до 15 м/с дальність розлітання іскор та продуктів піролізу від осередку горіння лучної рослинності становитиме 907,4 м.

Кількість особового складу пожежно-рятувального підрозділу для гасіння іскор, які розлітаються, визначається за залежністю:

$$N = K \frac{l_p l_{\phi}}{S_n}, \quad (4.9)$$

де, S_n – площа лучної пожежі, м^2 ;

l_p – дальність розлітання іскор, м;

l_{ϕ} – ширина фронту випадання іскор, яка рівна діаметру чи фронту лучної пожежі, м;

K – коефіцієнт, який враховує необхідність збільшення кількості особового складу пожежно-рятувального підрозділу за умов зміни напрямку і швидкості вітру, збільшення площі горіння тощо (у розрахунках приймається $K=1,5$).

У нашому випадку приймаємо площу лучної пожежі 3000 м^2 , ширина фронту випадання іскор 500 м , дальність розлітання іскор як наведено вище. Результати розрахунків кількості особового складу, який необхідно додатково залучити для гасіння іскор, які розлітаються від лучної пожежі наведено в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Кількість особового складу пожежно-рятувального підрозділу для гасіння іскор, які розлітаються від лучної пожежі

$v_6, \text{ м/с}$	$l_p, \text{ м}$	N
1	60,5	16
5	302,5	76
15	907,4	227

Таким чином, при швидкості вітру 15 м/с дальність розлітання іскор від лучної пожежі, площею 3000 м² становить 907,4 м, для гасіння якої необхідно залучити 227 людей. Оскільки особового складу ДСНС України під час гасіння таких масштабних пожеж для гасіння іскор не передбачається, слід до таких робіт долучити працівників лісового господарства, волонтерів, робітників промислових підприємств, населення, яке проживає поблизу.

Час рятування людини (чи групи людей) під час лучних пожеж складається із суми відстаней, який необхідно рятувальникам затратити до місця рятування та у зворотному шляху із врятованими людьми до їх швидкостей:

$$\tau_{\text{рят}} = \frac{L_1}{v_1} + \frac{L_2}{v_2}, \quad (4.10)$$

де, L_1 – відстань, яку необхідно пройти рятівнику (рятівникам) до місця рятування людини (людей), м;

L_2 – відстань, яку необхідно пройти рятівнику (рятівникам) із врятованою людиною (людьми) у зворотному напрямі, м;

v_1 – швидкість руху рятівника (рятівників) до місця рятування людини (людей), м/с;

v_2 – швидкість руху рятівника (рятівників) із врятованою людиною (людьми) у зворотному напрямі, м/с.

Для нашого випадку розрахунок часу рятування становитиме:

$$\tau_{\text{рят}} = \frac{L_1}{v_1} + \frac{L_2}{v_2} = \frac{286}{2} + \frac{286}{1} = 429 \text{ с} = 7,15 \text{ хв} = 0,12 \text{ год.}, \quad (4.11)$$

де, $L_1 = 286$ м – безпечна відстань влаштування протипожежного бар'єру, а отже мінімальна відстань розташування сил і засобів ДСНС України; $L_2 = 286$ м; $v_1 = 2$ м/с; $v_2 = 1$ м/с.

Отже, час рятування людини (чи групи людей) під час лучних пожеж на досліджуваних ділянках становить 0,12 год.

4.3. Експериментальні дослідження протипожежних бар'єрів у вигляді мінералізованих смуг

Експеримент проводився 24.07.2021 року у сонячну безвітряну погоду. Температура довкілля становила $+23^{\circ}\text{C}$. Координати розташування дослідних ділянок: 50.157599, 23.786120. Для експерименту було використано 2 мірні лінійки довжиною 2 м і 4,5 м; вологомір ґрунту МГ-44; секундомір; штикова лопата; зразки сухої рослинності. Дослідна ділянка до початку випробувань наведена на рис. 4.5.



Рисунок 4.5 – Досліджувана ділянка протипожежних бар'єрів у вигляді мінералізованих смуг

Експеримент передбачав встановити час займання рослинності за протипожежною мінералізованою смугою і висоту полум'я за різної ширини

мінералізованої смуги та змінної висоти сухої лучної рослинності. Повторюваність дослідів для кожної ширини протипожежної мінералізованої смуги 5-ти разова.

За умови ширини протипожежної мінералізованої смуги 0,1 м, займання сухої лучної рослинності вистою 0,1 м за смугою відбулося через 7 с після початку проведення експерименту. Із зростанням висоти сухостою час займання сухої лучної рослинності за смугою зменшувався та при висоті 0,4 м і 0,5 м становив 3 с (рис. 4.6).

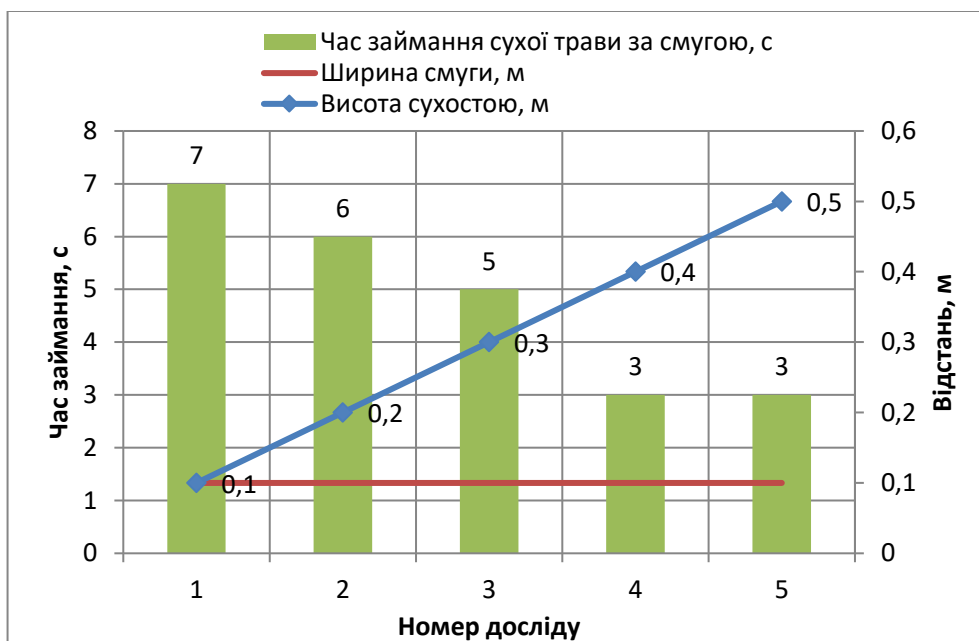


Рисунок 4.6 – Час займання сухої лучної рослинності при ширині мінералізованої смуги 0,1 м

За умови ширини протипожежної мінералізованої смуги 0,2 м, займання сухої лучної рослинності вистою 0,1 м, 0, 2 м, 0,3 м за смугою не відбувалося. Займання відбулося через 10 с після початку проведення експерименту з висотою сухостою 0,4 м. При висоті сухостою 0,5 м час займання сухої лучної рослинності становив 7 с (рис. 4.7).

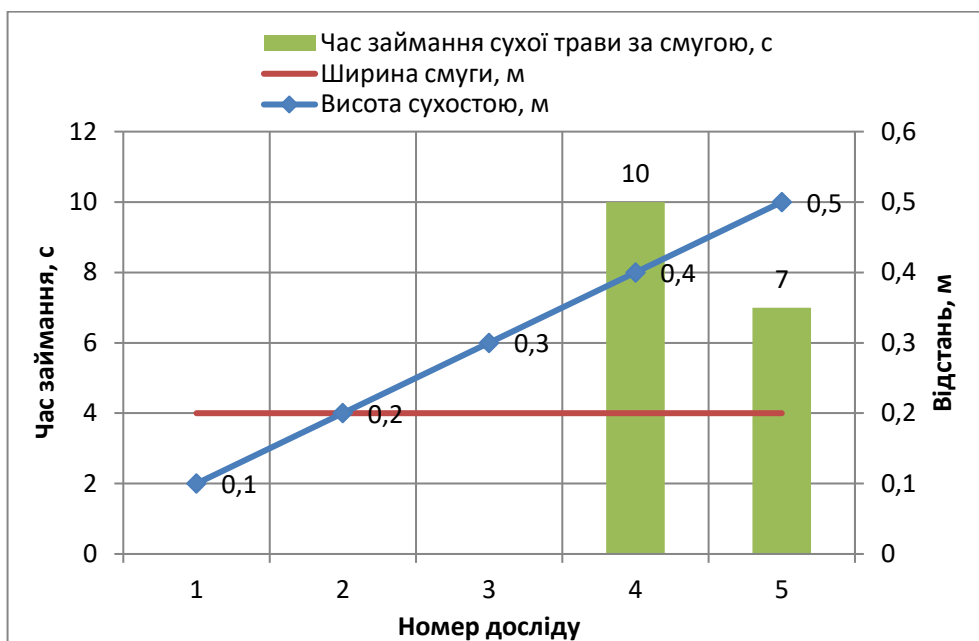


Рисунок 4.7 – Час займання сухої лучної рослинності при ширині мінералізованої смуги 0,2 м

За умови ширини протипожежної мінералізованої смуги 0,3 м, займання сухої лучної рослинності вистояю 0,1 м, 0, 2 м, 0,3 м за смугою не відбувалося. Займання відбулося через 8 с після початку проведення експерименту з висотою сухостою 0,4 м. При висоті сухостою 0,5 м час займання сухої лучної рослинності становив 10 с (рис. 4.8).

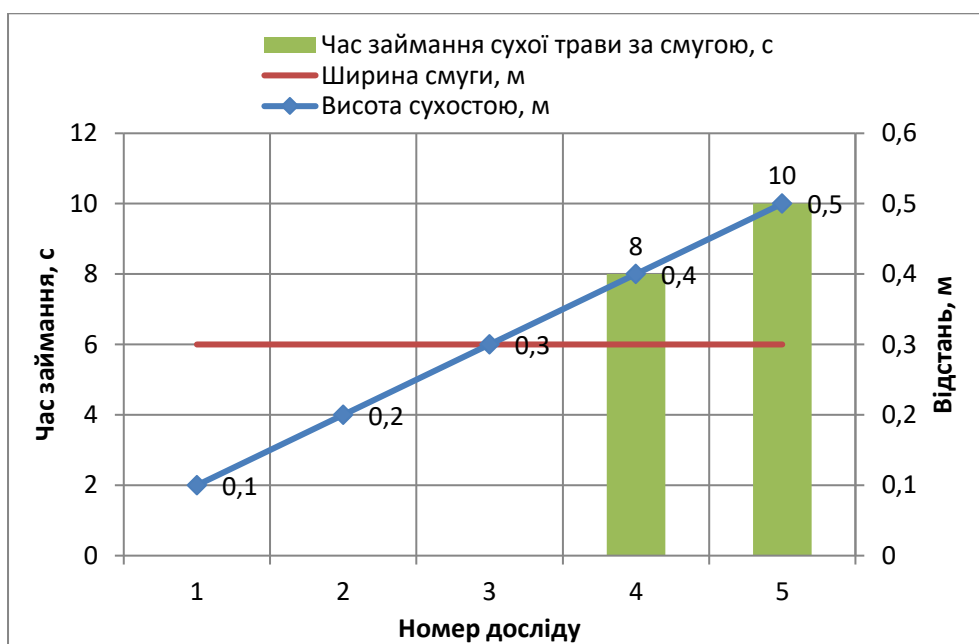


Рисунок 4.8 – Час займання сухої лучної рослинності при ширині мінералізованої смуги 0,3 м

За умови ширини протипожежної мінералізованої смуги 0,4 м, займання сухої лучної рослинності виствою 0,1 м, 0, 2 м, 0,3 м за смугою не відбувалося. Займання відбулося через 48 с після початку проведення експерименту з висотою сухостою 0,4 м. При висоті сухостою 0,5 м час займання сухої лучної рослинності становив 56 с (рис. 4.9).

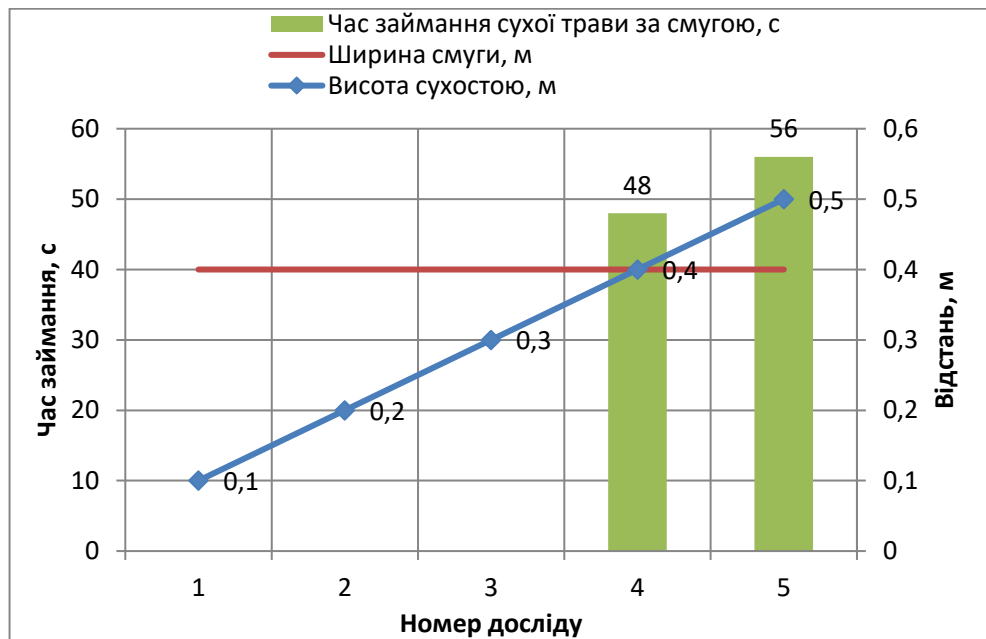


Рисунок 4.9 – Час займання сухої лучної рослинності при ширині мінералізованої смуги 0,4 м

Таким чином, на поширення ландшафтних пожеж в лучних екосистемах мають вирішальне значення 2 параметри – ширина мінералізованої протипожежної смуги та висота сухої лучної рослинності. Чим більша висота сухої лучної рослинності, тим ймовірність займання сусідньої аналогічної ділянки є вищою.

Важливим показником для розробки протипожежних заходів та попередження горіння лучної рослинності є висота полум'я у залежності від висоти сухої лучної рослинності (рис. 4.10).



Рисунок 4.10 – Експериментальні дослідження висоти полум'я під час горіння лучної рослинності

Встановлено, що на висоті 0,1 м сухої лучної рослинності за умови виникнення пожежі висота полум'я може досягати 0,65 м. При висоті 0,2 м сухої лучної рослинності за умови виникнення пожежі висота полум'я може досягати 0,75 м. Відповідно – при 0,3 м – висота полум'я 1,3 м; при 0,4 м – висота полум'я 1,6 м; при 0,5 м – висота полум'я 1,7 м (рис. 4.11).

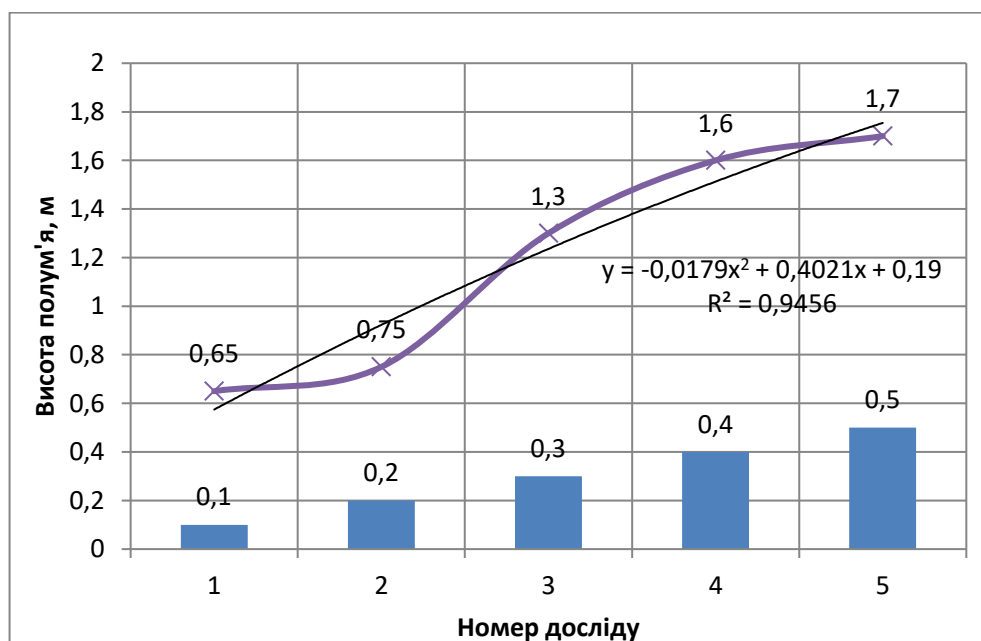


Рисунок 4.11 – Залежність висоти полум'я від висоти сухостою лучної рослинності під час пожежі

Залежність висоти полум'я від висоти сухостою лучної рослинності під час пожежі можна описати за допомогою рівняння:

$$H_n = -0,0179h^2 + 0,4021h + 0,19, \quad (4.12)$$

де h – висота сухої лучної рослинності.

4.4. Обвуглювання стовбурів листяних дерев під час лучних пожеж

Обвуглювання та умови горіння листяних порід дерев, поряд із хвойними, потребують детальнішого вивчення, оскільки на території Українського Розточчя переважають грабово-дубово-соснові, мішані дубові і букові ліси.

Для дослідження ступеня обвуглювання стовбурів листяних дерев було обрано три породи, які розвиваються в Українському Розточчі – граб звичайний (*Carpinus betulus*), дуб звичайний (*Quercus robur*) та клен звичайний або гостролистий (*Acer platanoides*). Діаметри досліджуваних порід наведено на рис. 4.12.

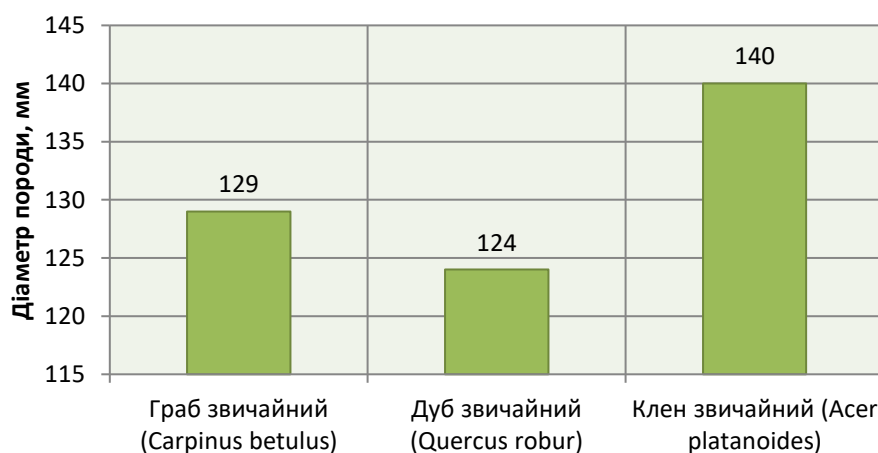


Рисунок 4.12 – Діаметри досліджуваних порід

Температурному впливу свіжозрізані породи піддавали протягом 10 хв, при цьому з інтервалами 1 хв, 3 хв, 5 хв перевіряли ступінь пошкодження стовбура (обвуглювання, см). Повторюваність досліду – триразова. Отримані дані дадуть

змогу встановити обвуглювання стовбурів листяних деревних порід Українського Розточчя.

Температуру полум'я вимірювали за допомогою безконтактного пірометра GM1150A. Для фіксації ступеня прогорання використовували мірну лінійку, виготовлену відповідно до ДСТУ. Для фіксації часу горіння використовувався секундомір.

Досліди виконували на свіжому повітрі за умов, максимально наближених до природних. Джерелом вогню слугувало штучне відкрите полум'я. Свіжозрізані колоди дерев встановлювали вертикально, безпосередньо у зоні горіння. Горючим матеріалом були порубкові рештки, опале сухе листя, солома, суха минулорічна трава.

Дослідження температурного впливу на основні лісоутворюючі породи досліджуваного регіону показали, що всі вони мають різний ступінь пошкодження. Пошкодженням слід вважати обвуглювання, оплавлення і вигорання матеріалів, з яких виготовлено зразок, на глибину понад 2 мм. Розмір пошкодження зразка вимірюється в сантиметрах у площині конструкції від межі контрольної зони, перпендикулярно до неї до найбільш віддаленої точки пошкодження зразка в контрольній зоні [103]. У нашому випадку пошкодження стовбурів дерев оцінювали за обвуглюванням.

Під час проведення дослідів максимальна температура полум'я становила +950°C [167].

Граб звичайний за першу хвилину проведення експерименту прогорів на 7 мм, що є найвищим показником для досліджуваних видів. Станом на третю хвилину горіння обвуглювання становило 25 мм та також має найвище значення. Через 5 хв від початку досліджень прогорання становило 30 мм. Станом на 10-ту хв стовбур прогорів повністю (рис. 4.13).



Рисунок 4.13 – Рівень прогорання грабу звичайного

Дуб звичайний за першу хвилину проведення експерименту прогорів на 3 мм, що є найнижчим показником для досліджуваних видів. Станом на третю хвилину горіння обвуглювання становило 10 мм та також має найнижче значення. Через 5 хв від початку досліджень прогорання становило 25 мм. Станом на 10-ту хв стовбур прогорів лише на 38 мм (рис. 4.14).



Рисунок 4.14 – Рівень прогорання дуба звичайного

Клен звичайний за першу хвилину проведення експерименту прогорів на 5 мм, що є середнім показником для досліджуваних видів. Станом на третю хвилину горіння обвуглювання становило 5 мм, що також є середнім значенням. Через 5 хв від початку досліджень прогорання становило 33 мм. Станом на 10-ту хв стовбур згорів повністю (рис. 4.15).



Рисунок 4.15 – Рівень прогорання клена звичайного

Результати досліджень динаміки обвуглювання наведено на рис. 4.16.

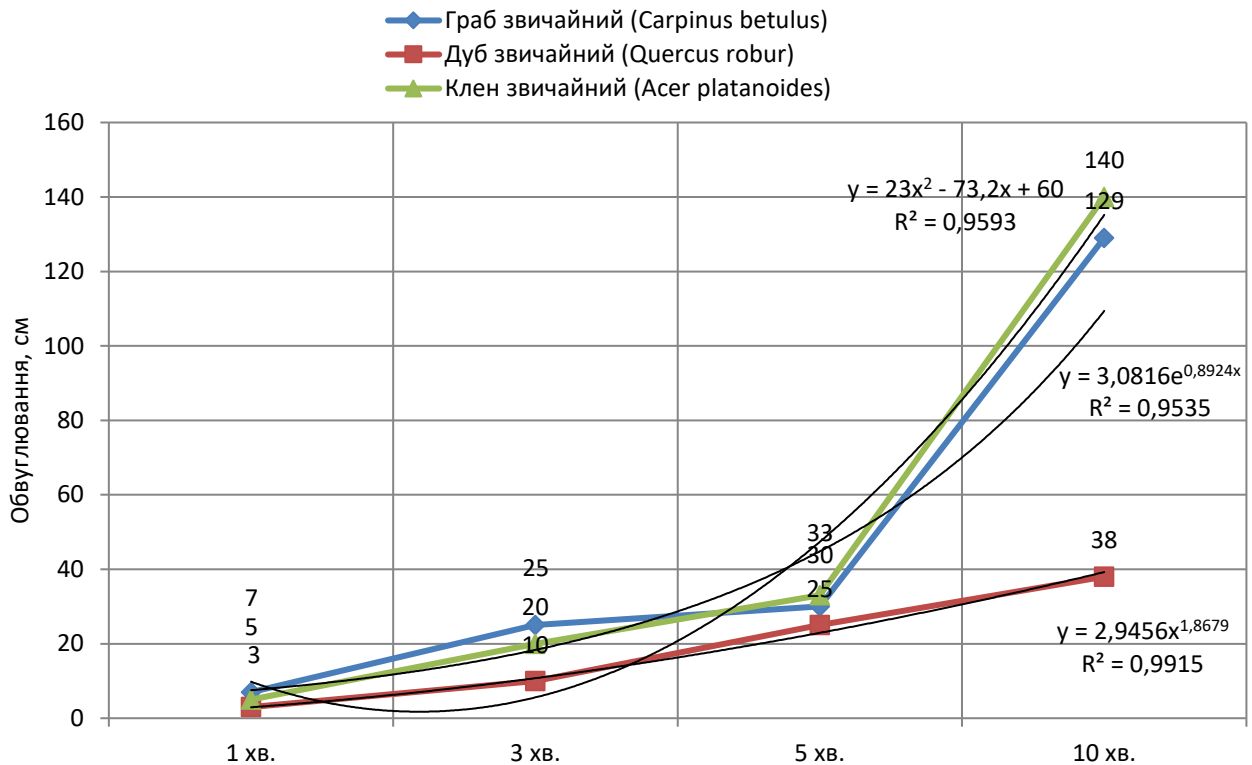


Рисунок 4.16 – Діаграма з даними про обвуглювання стовбурів деревних порід у різний момент часу від початку горіння

Математично динаміку обвуглювання для граба звичайного можна описати такою формулою:

$$l = 3,0816e^{0,8924t}, \quad (4.13)$$

де t – час горіння, хв.

Математично динаміку обвуглювання для дуба звичайного можна описати такою формулою:

$$l = 2,9456t^{1,8679}, \quad (4.14)$$

де t – час горіння, хв.

Математично динаміку обвуглювання для клена звичайного можна описати такою формулою:

$$l = 23t^2 - 73,2t + 60, \quad (4.15)$$

де t – час горіння, хв.

Дослідження температурного впливу на основні лісоутворюючі породи досліджуваного регіону показали, що всі вони відрізняються за обвуглюванням під час лісових пожеж. Було обрано три породи, які розвиваються в Українському Розточчі – граб звичайний (*Carpinus betulus*), дуб звичайний (*Quercus robur*) та клен звичайний (*Acer platanoides*).

Температурному впливу свіжозрізані породи піддавали протягом 10 хв., при цьому з інтервалами 1 хв, 3 хв, 5 хв перевіряли ступінь пошкодження стовбура (обвуглювання, мм). Повторюваність досліду – триразова. Встановлено, що найнижчий ступінь обвуглювання має дуб звичайний, який протягом 10 хв прогорів на 38 мм (при товщині колоди 124 мм). Такі породи як граб звичайний та клен гостролистий повністю перегоріли за 10 хв (при діаметрах 129 мм та 140 мм відповідно).

Для профілактики пожеж у лісових масивах слід проектувати протипожежні розриви із насадженнями дуба звичайного на узліссі.

4.5. Теоретичні аспекти формування пожежостійких узлісь

Пожежостійкі узлісся – смуги листяних або мішаних деревостанів шириною 150-200 м, смуги хвойних насаджень шириною 200-300 м навколо пожежонебезпечних ділянок хвойного лісу, а також ці смуги, що розташовані навколо лісних селищ, дачних ділянок, лісних кордонів [144].

Внаслідок локалізації та ліквідації великих і особливо великих лісових пожеж, пожеж у природних екосистемах залучається значна кількість особового складу та техніки працівників лісового господарства та пожежно-рятувальної служби. Під час такого роду пожеж знищуються практично усі компоненти довкілля – флора, фауна, засолюються ґрунти, забруднюються річки, водойми, повітря. Пожежі у природних екосистемах спричиняють потрапляння в атмосферу значної кількості летких продуктів горіння неповного розпаду та небезпечних речовин і сполук.

Експериментальні дослідження з вивчення впливу ландшафтних пожеж на екологічний стан едафотопу здійснювалися на території Українського Розточчя поблизу Рава-Руського лісництва в селі Лавриків Жовківського району Львівської області. Спостерігалось, що внаслідок умисного підпалу сухої трави у 2014 році виникли значні загоряння насаджень сосни звичайної в межах Українського Розточчя. Ці пожежі спричинили термічну деструкцію комелів, стовбурів, нижніх гілок сосен 6-ти річного віку. Близько 10% особин згоріли або висохли у післяпожежний період.

Протягом 2-х років після пожежі спостерігалось коричнево-руде забарвлення соснового насадження. У 2017 році здійснювалися проміжні польові дослідження екологічного стану насаджень, які піддавалися температурному впливу. На той час були видимі ушкодження органів особин сосни – стовбурів та нижніх гілок.



Рисунок 4.17 – Термічна деструкція стовбурів сосни звичайної внаслідок низової пожежі (спостереження 2017 року)

Кора на стовбурах ще не була відновлена та у місцях горіння спостерігалася гниль. Проте, на верхніх гілках не спостерігалось ознак ушкодження і вони продовжували свій ріст та розвиток. У даний час відновлення органів рослин практично відбулося повністю. Внаслідок природних фітомеліоративних процесів екосистема відновилася, з'явилися у підрості молоді особини сосни звичайної, на узліссі з'явилися такі види як клен гостролистий та береза повисла.

Таким чином, можна констатувати, що низова пожежа, яка у 2014 році перекинулася на насадження шестирічної сосни звичайної спричинила значні ушкодження особинам. Відновлення органів рослин відбувається до цього часу. Зазначимо, що пожежі у молодих соснових насадженнях відносяться до першого класу пожежної небезпеки.

Пожежі у природних екосистемах, до яких відносяться лучні пожежі, характеризуються високими температурами. Найвагоміший тут променевий теплообмін між тілами. При температурах $+800^{\circ}\text{C}$ та вище теплообмін між тілами відбувається лише за рахунок випромінювання, та як частка конвективного тепла незначна [179]. Випромінювання тепла полум'ям і продуктами згорання в умовах лучних пожеж викликає займання сусідніх горючих матеріалів. Водночас променева енергія перешкоджає процесам пожежогасіння.

Одним із основних методів локалізації пожеж в природних екосистемах та лісових пожеж є формування пожежостійких узлісь. Така практика спостерігається в Україні. А саме кафедрою лісівництва НУБіП України у Боярській ЛДС був закладений лісокультурно-лісівничий експеримент. Мета його полягала у створенні пожежостійкого узлісся із листяних деревних видів на межі лісів Боярської Лісодослідної станції з заплавою, де майже щорічно викають пожежі. Експеримент розрахований на 50 років. Цей багаторічний експеримент дозволить прослідкувати вплив лісових протипожежних узлісь на рух вогню у глибину лісу та визначити їх оптимальні параметри [112].

Також науковці кафедри лісівництва ННІ лісового і садово-паркового господарства НУБіП України та фахівці ДП "Остерський військовий лісгосп" спільно розпочали науковий експеримент зі створення пожежостійких узлісь для

захисту насаджень підприємства, які щовесни потерпають від навмисних підпалів на межі з заплавою р. Десна. Про що йдеться у новинах на сайті НУБіП України. Метою наукового експерименту є апробація різних шляхів підвищення пожежостійкості лісових узлісь для запобігання поширенню пожеж з відкритих ландшафтів у соснові насадження ДП "Остерський військовий лісгосп". Для створення пожежостійких узлісь підібрано листяні деревні види (береза, осика), попередньо проведено експрес аналіз ґруну, підготовку ґрунту борознами та підібрано потрібну схему посадки у відповідності до умов місцезростання [101].

З метою вивчення особливостей підбору видового складу для формування пожежостійких узлісь в умовах Українського Розточчя нами були відібрані зразки деревини та їх органів з метою визначення їх температур займання та самозаймання. Експерименти проводилися в сертифікованій лабораторії Львівського державного університету безпеки життєдіяльності «Науково-дослідна лабораторія пожежної безпеки». Свідоцтво про атестацію № РЛ 031/21 чинне до 27 травня 2025 р. Ліцензія ДДПБ МНС України серія АГ № 506341 від 11.02.2011 р. Результати досліджень засвідчені відповідними сертифікатами встановленого взірця та наведені на рис. 1.1 і 1.2.

Результати лабораторних досліджень температури займання та самозаймання брусків досліджуваних видів показали, що найменш терmostійкою є сосна звичайна. Температура займання склала $+245\text{ }^{\circ}\text{C}$, самозаймання – $+455\text{ }^{\circ}\text{C}$. Найвищими температурами займання і самозаймання деревини охарактеризовано граб звичайний ($T_z = +270\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{cz} = +475\text{ }^{\circ}\text{C}$) і дуб звичайний ($T_z = +285\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{cz} = +465\text{ }^{\circ}\text{C}$). Береза повисла і клен гостролистий мають середні показники серед досліджуваних видів (рис. 4.18).

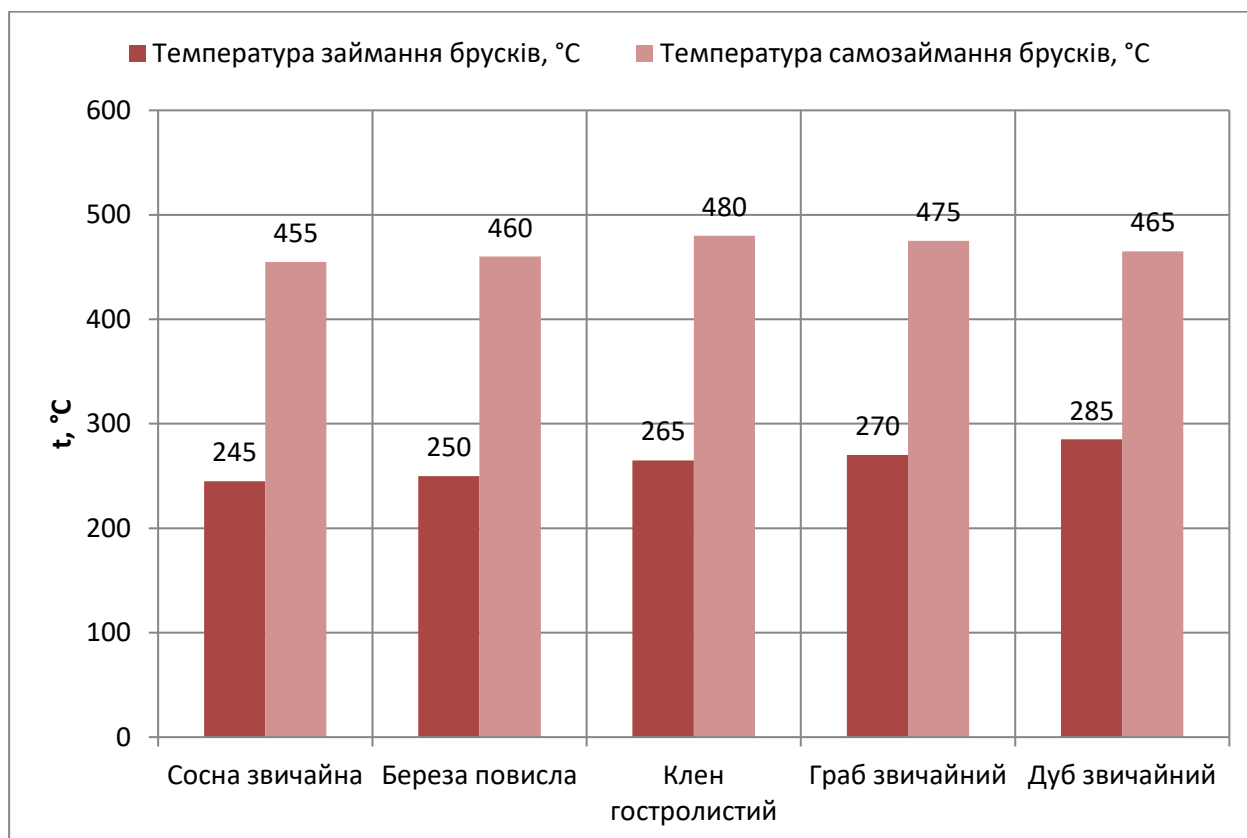


Рисунок 4.18 – Температура займання та самозаймання брусків досліджуваних видів

Результати лабораторних досліджень температури займання та самозаймання гілок і листя (хвої) досліджуваних видів показали, що найменш термостійкою є клен гостролистий ($T_z = +300$ °C, $T_{cz} = +495$ °C) і сосна звичайна ($T_z = +305$ °C, $T_{cz} = +500$ °C). Найвищими температурами займання і самозаймання деревини охарактеризовано граб звичайний ($T_z = +320$ °C, $T_{cz} = +475$ °C). Дуб звичайний ($T_z = +315$ °C, $T_{cz} = +485$ °C) мають середні показники серед досліджуваних видів займанні та самозаймання гілок і листя (рис. 4.19).

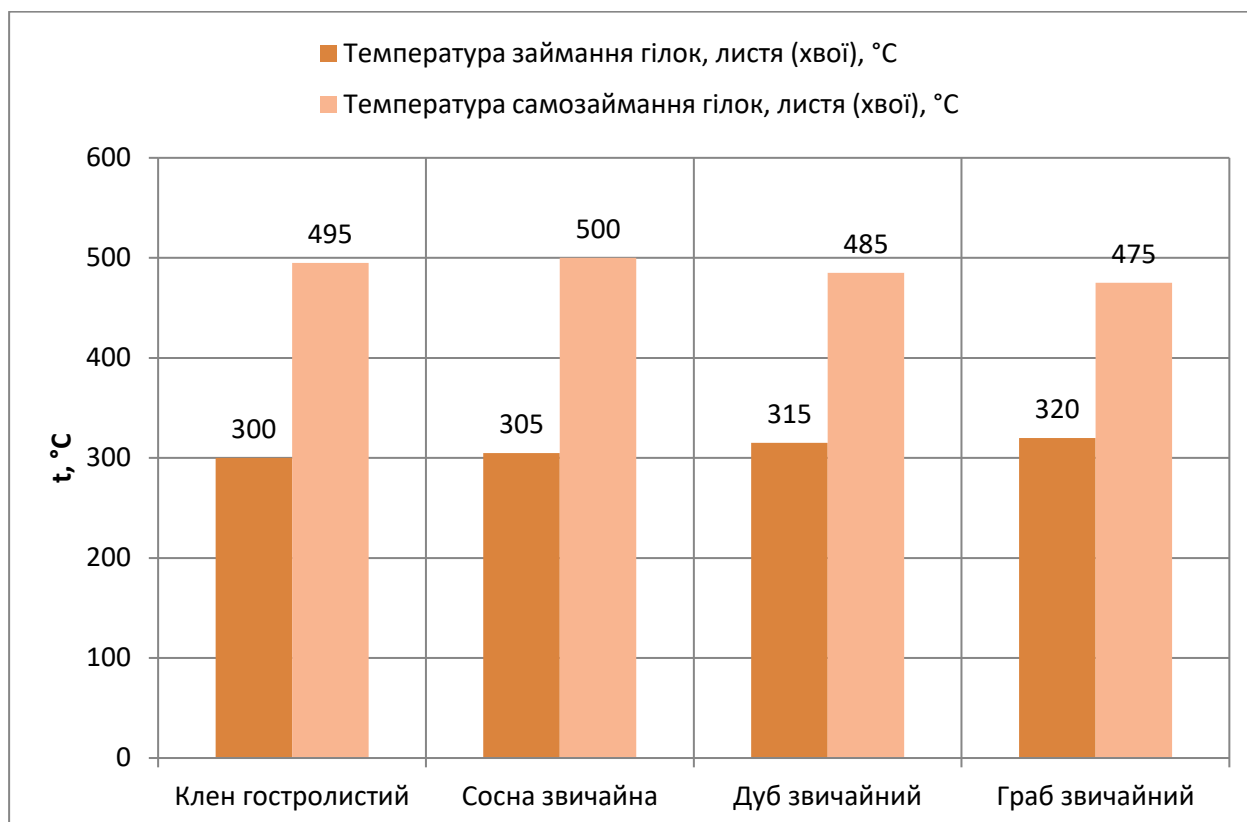


Рисунок 4.19 – Температура займання та самозаймання гілок і листя (хвої) досліджуваних видів

Таким чином, в умовах Українського Розточчя для формування пожежостійких узлісь слід передбачити за участю дуба звичайного і граба звичайного, які займаються та самозаймаються при вищих температурах, ніж інші види дерев. Особливо такі узлісся слід влаштовувати на ділянках загального лісокористування, де переважає сосна звичайна, оскільки такого типу ліси є найменш захищеними від вогню.

Зауважимо, що для фітомеліоративного відновлення згарищ необхідно використовувати рослинність із високими показниками жаростійкості. У зв'язку із горимістю та високою чутливістю до радіації хвойні види не рекомендуємо використовувати для відновлення порушених земель. Важливою складовою заходів відновлення порушених територій вогнем є вологість субстрату, яка впливає на життєвість лісових рослин. Також вологість має вплив на комплексний показник пожежної небезпеки в лісі.

4.6. Розрахунок сил і засобів для гасіння лучних пожеж

Кількість стволів для гасіння лучних пожеж визначається за формулою:

$$N_{ств} = \frac{Q_n}{q_{ств}}, \quad (4.16)$$

де Q_n – витрата води на всю площу гасіння, л/с;

$q_{ств}$ – витрата ствола, л/с (приймаємо 7,4 л/с для ручного ствола РСП-70).

$$Q_n = S_n I_n, \quad (4.17)$$

де S_n – площа лучної пожежі, м² (приймаємо 3000 м²);

I_n – інтенсивність подачі вогнегасних засобів, л/(с·м²) (приймаємо 0,06 л/(с·м²)).

Відстань між стволами, які розміщені по периметру лучної пожежі, визначається за залежністю:

$$l_{ств} = \frac{g_{ств}}{I_n h}, \quad (4.18)$$

де, $g_{ств}$ – розхід ствола, л/с;

I – інтенсивність подачі вогнегасного засобу, л/(м²·с) (приймаємо 0,06 л/(с·м²));

h – глибина гасіння, м (приймаємо 10 м).

Для нашого випадку: $Q_n = 3000 \cdot 0,06 = 180$ л/с; $N_{ств} = 180 / 7,4 = 25$ шт.; $l_{ств} = 7,4 / (0,06 \cdot 10) = 12,3$ м. Отже, для гасіння лучної пожежі площею 3000 м² необхідно 25 ручних стволів пожежних РСП-70, відстань між якими повинна бути не менше 12,3 м.

Швидкість поширення фронту лучних пожеж визначається емпіричним методом:

$$V_{\phi} = (V_0 + k \cdot V_{\epsilon}) \cdot \left(1 + \frac{V_{\epsilon}}{\sqrt{V_{\epsilon}^2 + C^2}} \right), \quad (4.19)$$

де V_0 – швидкість поширення пожежі на рівнині у безвітряну погоду, м/с;

k – коефіцієнт, який враховує роздмхуючий вплив полум'я і залежить від вологості горючого матеріалу (табличне значення $k = 0,16-0,45$);

V_{ϵ} – швидкість вітру, м/с;

C – коефіцієнт, який враховує питому теплоємність горючого матеріалу (табличне значення $C = 3,0-3,5$).

Нами здійснено моделювання швидкості поширення фронту лучної пожежі в досліджуваному регіоні з врахуванням різної вологості горючого матеріалу (лучної рослинності), швидкості вітру та коефіцієнтів k і C .

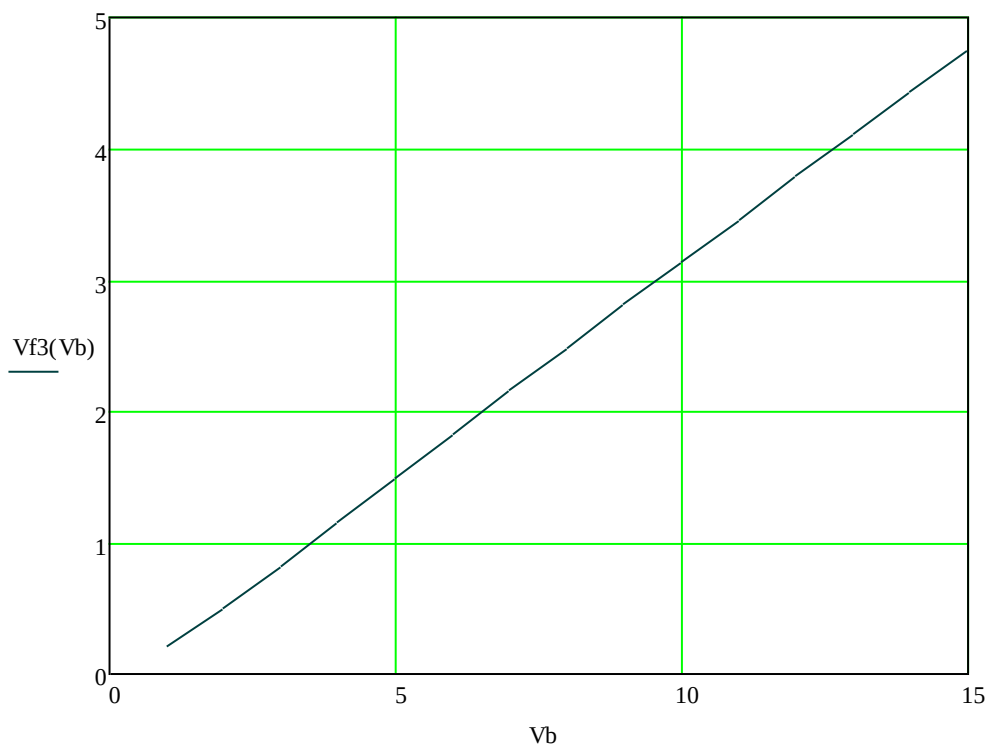


Рисунок 4.20 – Моделювання швидкості поширення фронту лучної пожежі (м/с) за умов вологості сухостою $\varphi > 50\%$ та значень – $k=0,16$; $c=3$; $V_0=0,005$ м/с

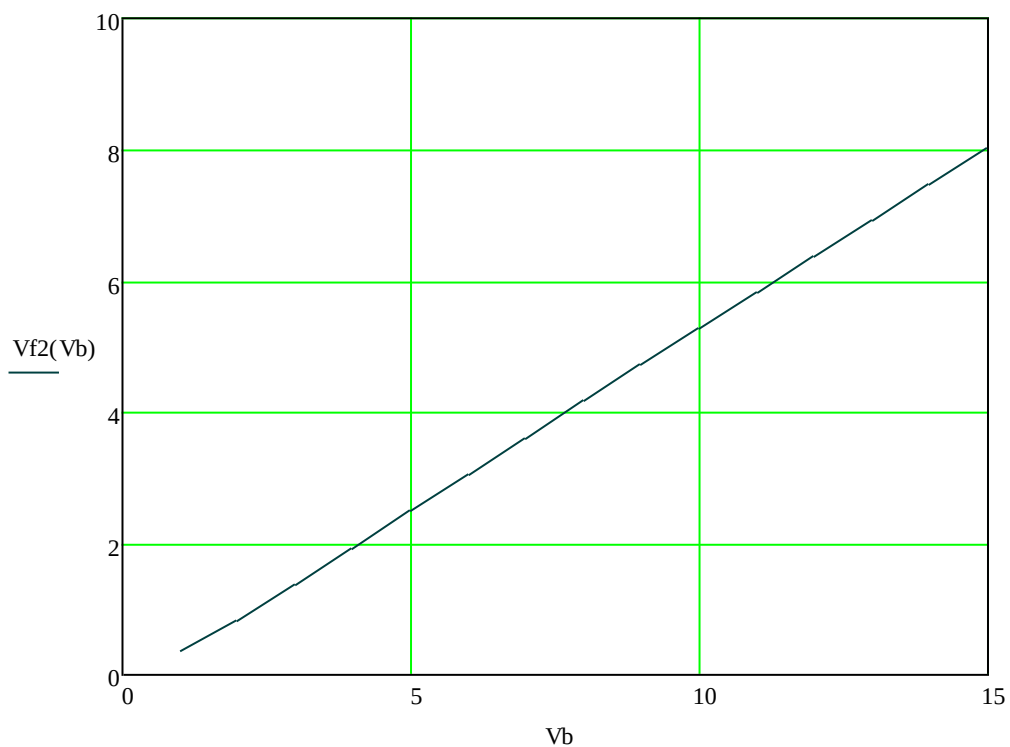


Рисунок 4.21 – Моделювання швидкості поширення фронту лучної пожежі (м/с) за умов вологості сухостою 30-50% та значень – $k=0,27$; $c=3,3$; $V_0=0,005$ м/с

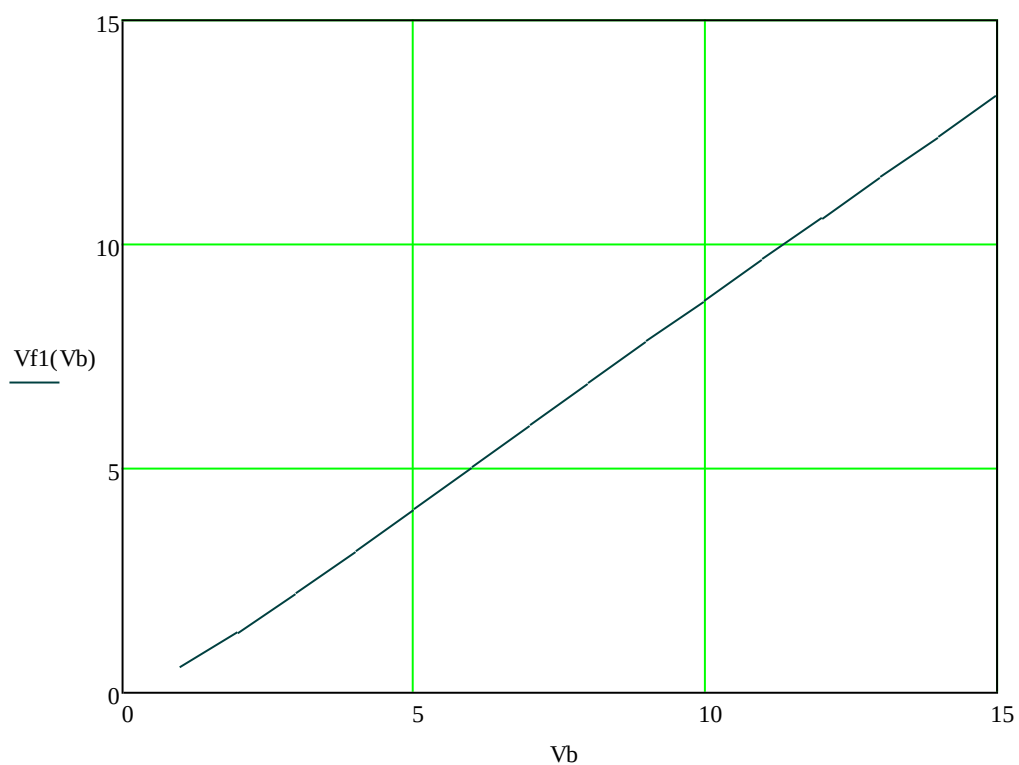


Рисунок 4.22 – Моделювання швидкості поширення фронту лучної пожежі (м/с) за умов вологості сухостою $<30\%$ та значень – $k=0,45$; $c=3,5$; $V_0=0,008$ м/с

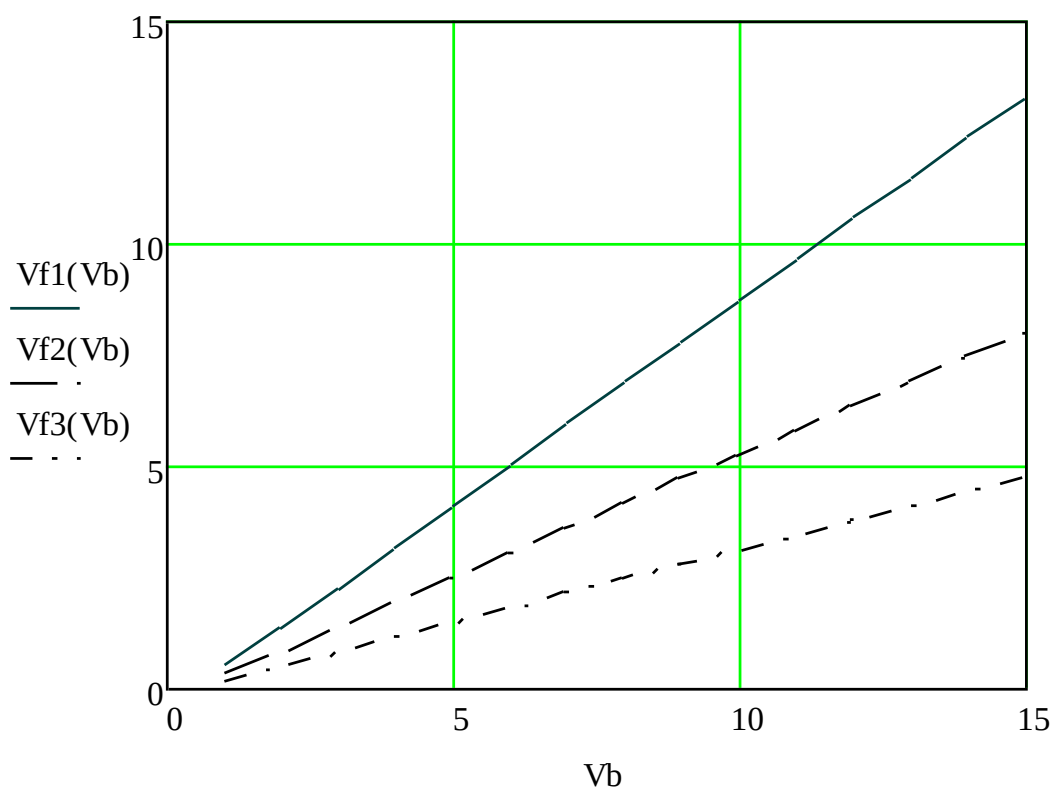


Рисунок 4.23 – Моделювання швидкості поширення фронту лучної пожежі (м/с) за різних умов φ , k , c , V_0

Таким чином, завдяки моделюванню швидкості поширення фронту лучної пожежі в досліджуваному регіоні та врахуванням різної вологості горючого матеріалу (лучної рослинності), швидкості вітру (від 0 до 15 м/с) та коефіцієнтів k і C можна здійснити прогнозування розвитку та кількості сил і засобів для її ліквідації.

Час гасіння лучної пожежі визначається за допомогою наступної емпіричної формули:

$$\tau_{\text{гас}} = \frac{L(\frac{n_n}{2} - 1)}{n_n \cdot V_{\text{пер}}} + \frac{L}{n_n \sqrt{W_1^2 - V_{\text{кр}}^2}}, \quad (4.20)$$

де L – довжина крайки лучної пожежі, м;

n_n – кількість пожежних, які приймають участь в гасіння лучної пожежі (моделюємо для 1 відділення $n_n = 6$ чол. та 2 відділень $n_n = 13$ чол.);

$V_{пер}$ – середня швидкість пересування пожежників по луці під час гасіння пожежі, м/хв (приймаємо 25 м/хв);

W – середня швидкість (продуктивність гасіння) одного пожежника під час гасіння пожежі, м/хв (приймаємо 3 м/хв);

$V_{кр}$ – середня швидкість пересування крайки пожежі по луці під час горіння лучної рослинності, м/хв (приймаємо 2 м/хв).

Таким чином, нами здійснено моделювання часу гасіння (хв) крайки лучної пожежі довжиною від 1 до 3000 м за допомогою 6-ти пожежників (1 відділення) та 13-ти пожежників (2 відділення). Результати моделювання наведено на рис. 4.24 і 4.25.

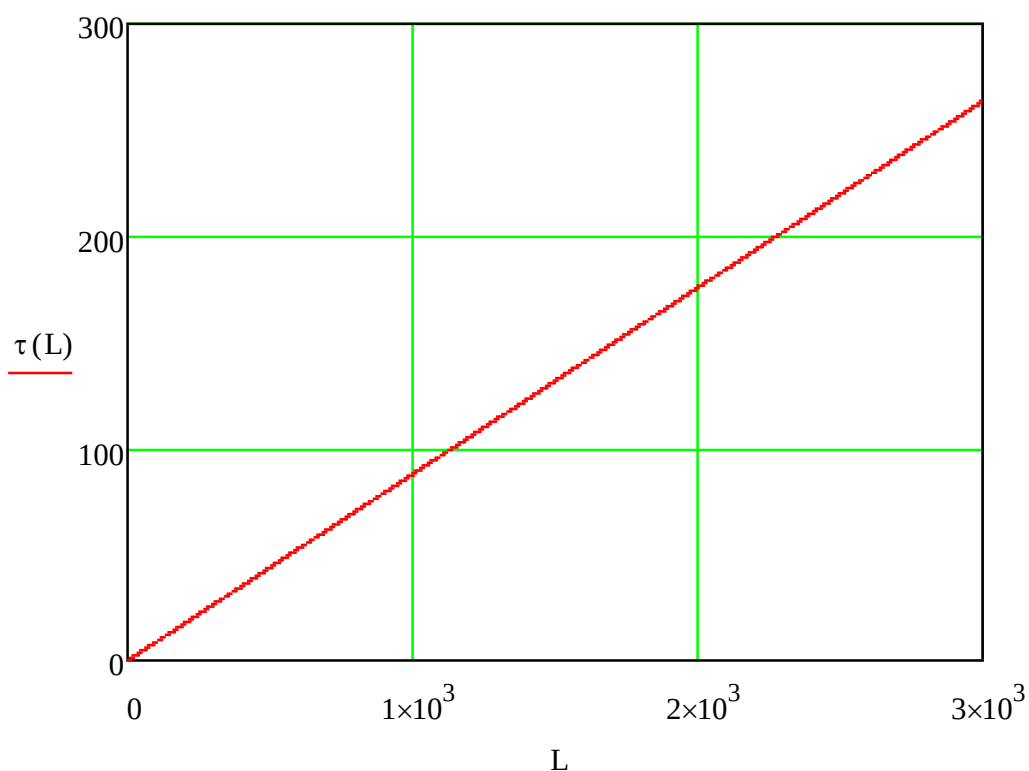


Рисунок 4.24 – Моделювання часу гасіння (хв) крайки лучної пожежі довжиною від 1 до 3000 м за допомогою 6-ти пожежників (1 відділення)

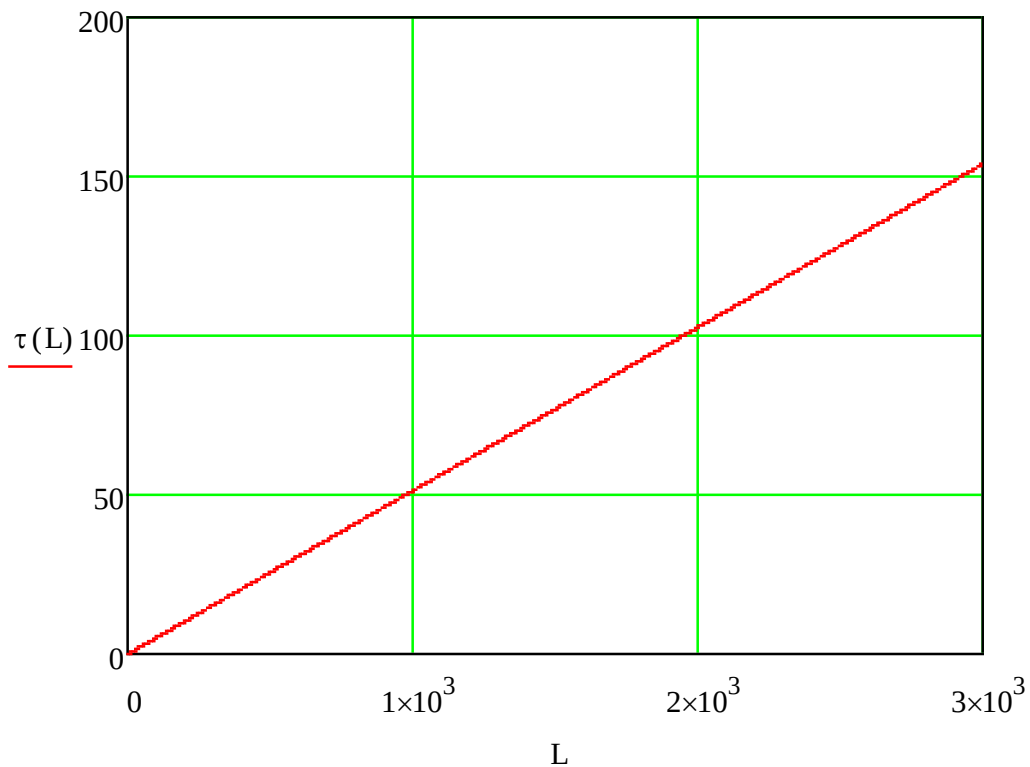


Рисунок 4.25 – Моделювання часу гасіння (хв) крайки лучної пожежі довжиною від 1 до 3000 м за допомогою 13-ти пожежників (2 відділення)

Визначення часу гасіння крайки лучної пожежі (у нашому випадку довжиною від 1 до 3000 м) є важливим із точки зору пожежної тактики та експлуатації пожежно-рятувальної техніки. Важливим показником для успішного гасіння лучної пожежі є чисельність особового складу оперативно-рятувальної служби ДСНС України, які залучені до пожежогасіння.

4.7. Логістичні ланцюги експлуатації протипожежної техніки під час гасіння пожеж у природних екосистемах

Під час ліквідації пожеж в екосистемах та лісових пожеж застосовуються різноманітні технічні засоби та устаткування різних виробників та відомчої приналежності. Створюють пожежну та аварійно-рятувальну техніку на численних заводах та імпортують із-за кордону. Ліквідація пожеж у природних екосистемах та лісових пожеж була б неможливою без застосування транспортних

засобів. Тому під час ліквідації надзвичайних ситуацій транспорт виступає як об'єднуючий елемент взаємодії різних служб реагування. Класифікаційне групування пожежної та аварійно-рятувальної техніки, призначеної для гасіння пожеж у природних екосистемах та лісових пожеж надасть змогу підвищити ефективність управління силами і засобами на пожежі за допомогою ієрархічної структури поділу технічних засобів у відповідності до завдань, що можуть бути ними виконані.

Вибір способів і методів гасіння пожежі в екосистемі залежить від виду, швидкості її поширення, природних умов, наявності сил і засобів пожежогасіння та тактичних прийомів. Застосування пристосованої техніки значно прискорює процес локалізації та ліквідації лісової пожежі.

Як показує аналіз джерел і досвід в боротьбі з лісовими пожежами велике значення має чинник часу. Від моменту виявлення лісової пожежі до прийняття управлінського рішення щодо її гасіння має проходити якомога менше часу. При цьому найважливішим завданням є організація та ефективне використання наявних сил і засобів пожежогасіння. При визначенні кількості сил і засобів для гасіння лісових пожеж необхідно враховувати інтенсивність процесу горіння та швидкість поширення лісової пожежі, а також ступінь пожежної небезпеки. На підставі прогнозу розвитку пожежі з врахуванням лісопiрологiчних характеристик ділянок, що оточують пожежу, з врахуванням можливих розривів (річок, струмків, доріг і ін.) розробляється план гасіння лісової пожежі, визначаються прийоми і способи зупинки фронту вогню. Керівник гасіння лісової пожежі в усіх випадках має виходити з потреби забезпечення найбільш швидкої локалізації пожежі силами, що знаходяться в його розпорядженні, і засобами, використовуючи, насамперед, природні перешкоди, що є на місцевості, для усунення потенційних шляхів поширення фронту вогню, а також можливості сучасних ефективних засобів і способів пожежогасіння.

У загальному випадку управління процесом гасіння лісової пожежі можна розглядати як управління складними організаційними системами, який складається з таких етапів: збирання інформації, прийняття (вироблення та вибір)

рішення, реалізація прийнятого рішення. Ці етапи циклічно повторюються, при цьому на кожному наступному кроці оцінюється якість процесу управління на попередньому кроці.

Науковцями [97] сформульована постановка задачі оптимального управління процесом ліквідації лісової пожежі, у якій управління $U(t)$ визначене на невідомому проміжку часу $[t_2, t_6]$. У разі лінійної залежності між зміною швидкості зменшення площі лісової пожежі $P(t_4 - t_2, V, m)$ та кількістю задіяних протипожежних сил і засобів $N(t)$ оптимальна тактика управління полягає у визначенні двох моментів часу – t' , t'' ($t_2 \leq t' < t'' \leq t_4$). Знаючи їх, можна визначити оптимальне управління $\bar{U}(t)$, яке має такий вигляд [182]:

$$\bar{U}(t) = \begin{cases} +N(t), & \text{якщо } t_2 \leq t \leq t' \\ 0, & \text{якщо } t' \leq t \leq t'' \\ -N(t), & \text{якщо } t'' \leq t \leq t_4 \end{cases} ; \quad (4.21)$$

Автори за допомогою вищенаведеної системи рівнянь декларують про розгляд управління етапами ліквідації лісової пожежі.

Для створення логістичних ланцюгів залучення пожежної техніки для ліквідації надзвичайних ситуацій у природних екосистемах необхідно досконало знати тактико-технічні характеристики наявних засобів. Для гасіння торфових пожеж нами було обрано три сценарії – слабкі, сильні та середні пожежі.

Найсприятливішими періодами виникнення торфових пожеж вважається друга половина літа, якій сприяють сильні посухи. Торф'яні пожежі небезпечні раптовими проривами вогню з-під землі і тим, що їх межа не завжди помітна. Ознакою підземної торф'яної пожежі є характерний запах гару, місцями з-під землі просочується дим, а сама земля нагрівається. Торф вигоряє зсередини, утворюючи пустоти, в які можна провалитися і згоріти. Температура в шарі торфу, охопленого пожежею, більше тисячі градусів.

Усі пожежі на торфополях підрозділяють на відкриті (коли горить торф на поверхні поля) та підземні (у товщині шару торфу). Під час горіння торфу виділяється велика кількість диму, температура горіння на поверхні ділянок

досягає $+450-500^{\circ}\text{C}$, а на поверхні штабелів та бунтів - $+600-800^{\circ}\text{C}$. Великий вплив на розповсюдження вогню поверхнею торфу мають метеорологічні фактори: швидкість вітру, температура та вологість повітря.

Техніка, яка залучається – це автомобілі протипожежні лісові та пристосована техніка. Ланцюг залучення техніки зображено на рисунку 4.26.

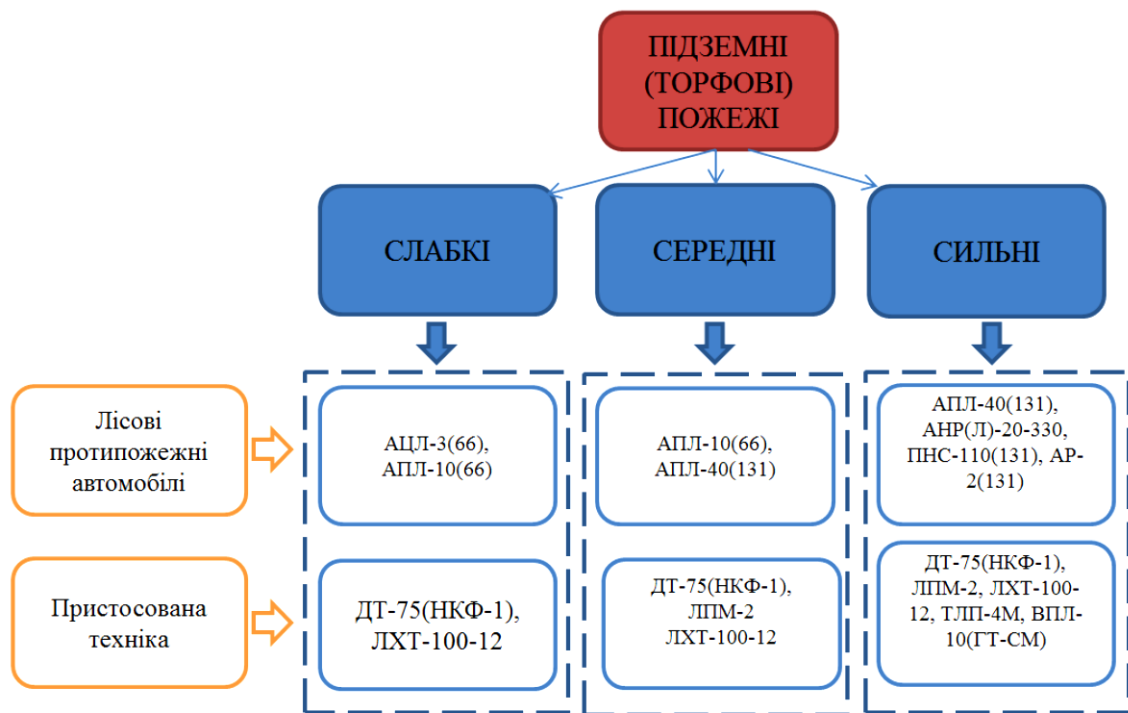


Рисунок 4.26 – Логістичний ланцюг залучення протипожежної техніки для гасіння підземних (торфових) пожеж

При виборі пристосованої техніки для гасіння лісових пожеж необхідно враховувати габаритні розміри транспортного засобу, кількість особового складу, можливість подачі води, необхідність використання бульдозерного обладнання, умови довкілля, видовий склад лісу [50].

Комплексне використання пристосованих транспортних засобів із автомобілями пожежними лісовими, функціональні можливості яких не дозволяють виконати ряд додаткових робіт, забезпечує більшу ефективність гасіння лісових та торфовищних пожеж.

Низова пожежа може розвиватися, в залежності від умов - швидко або повільно. Низова пожежа проходить за умов сухого горючого матеріалу з рихлим розміщенням і дрібними часточками. Кількість виділеного тепла достатня для

підсушування сусідніх часточок матеріалу, а горючі матеріали більших розмірів з підвищеною вологістю, вогонь обходить і швидко просувається в глибину лісу. Такі пожежі найчастіше відбуваються ранньою весною, коли відбувся процес висушування минулорічних трав, поверхні опаду, відсутність листя. Великої шкоди такий вид пожежі не завдає, але якщо він виникає або переноситься в хвойні культури, в такому випадку створюється загроза виникненню верхової пожежі.

У випадку виникнення низових пожеж у природних екосистемах залучається техніка, яка має достатній запас рідких вогнегасних засобів. Також неодмінною одиницею повинен бути ґрунтомет. Найбільш вдалою моделлю є ґрунтомет українського виробництва на базі колісного трактора Т-150 – ГТ-3. Логістичний ланцюг залучення техніки наведено на рис. 4.27.

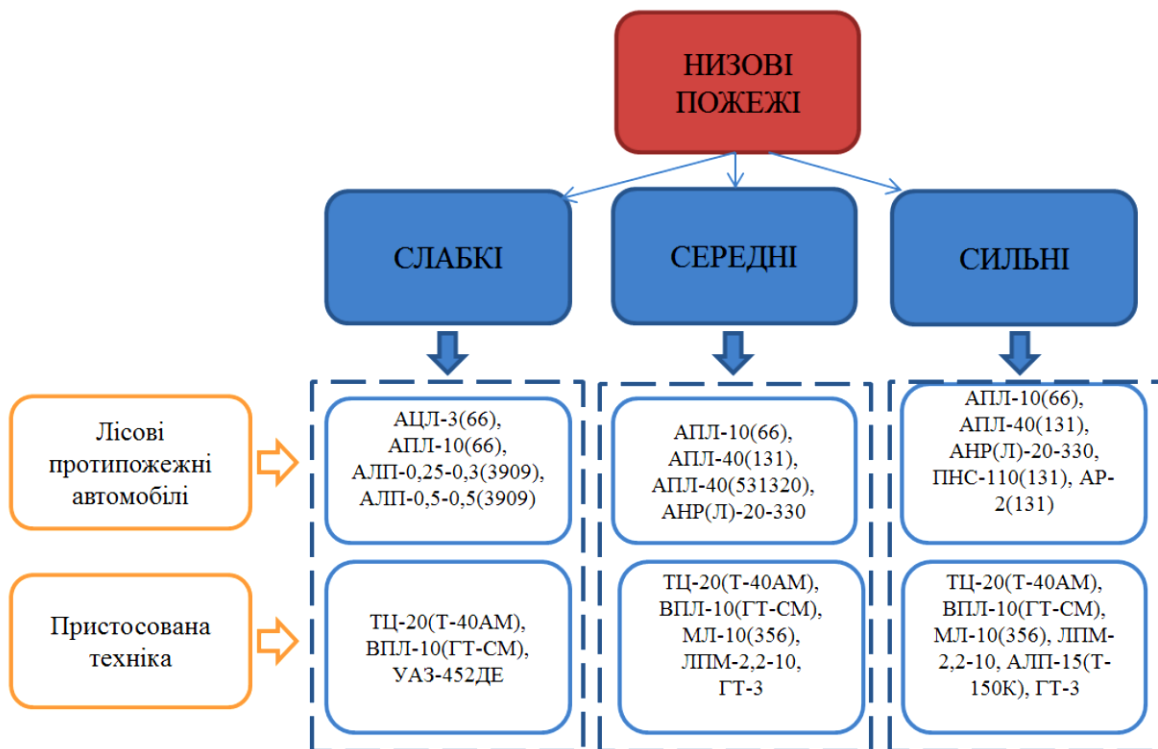


Рисунок 4.27 – Логістичний ланцюг залучення протипожежної техніки для гасіння низових пожеж

Значно відмінною є природа виникнення і поширення лісової пожежі в гірських лісах, де основну роль відіграє рельєф місцевості. Виникнення пожежі

розпочинається біля підніжжя схилу і фронт її піднімається до хребта. Зі збільшенням крутизни схилів швидкість нарощування пожежі зростає і може поступово перейти в верхову. Суттєву роль в розповсюдженні вогню відіграє вітер, напрямки поширення його відбуваються за законами добової конвенції. З настанням прохолоди, вночі, вітер дує в долину, витісняючи тепле повітря, а, вдень, цей процес йде в зворотному напрямку. Врахування всіх особливостей гірської місцевості, дає змогу правильно розробити тактику боротьби з пожежами.

У випадку виникнення верхових пожеж у природних екосистемах залучається техніка, яка має достатній запас рідких вогнегасних засобів, значний напір на насосі та авіаційну техніку. Неодмінною одиницею повинен бути надувний резервуар, який забезпечує протипожежний насосний автомобіль АНР(Л)-20-330.

Логістичний ланцюг залучення техніки наведено на рис. 4.28.

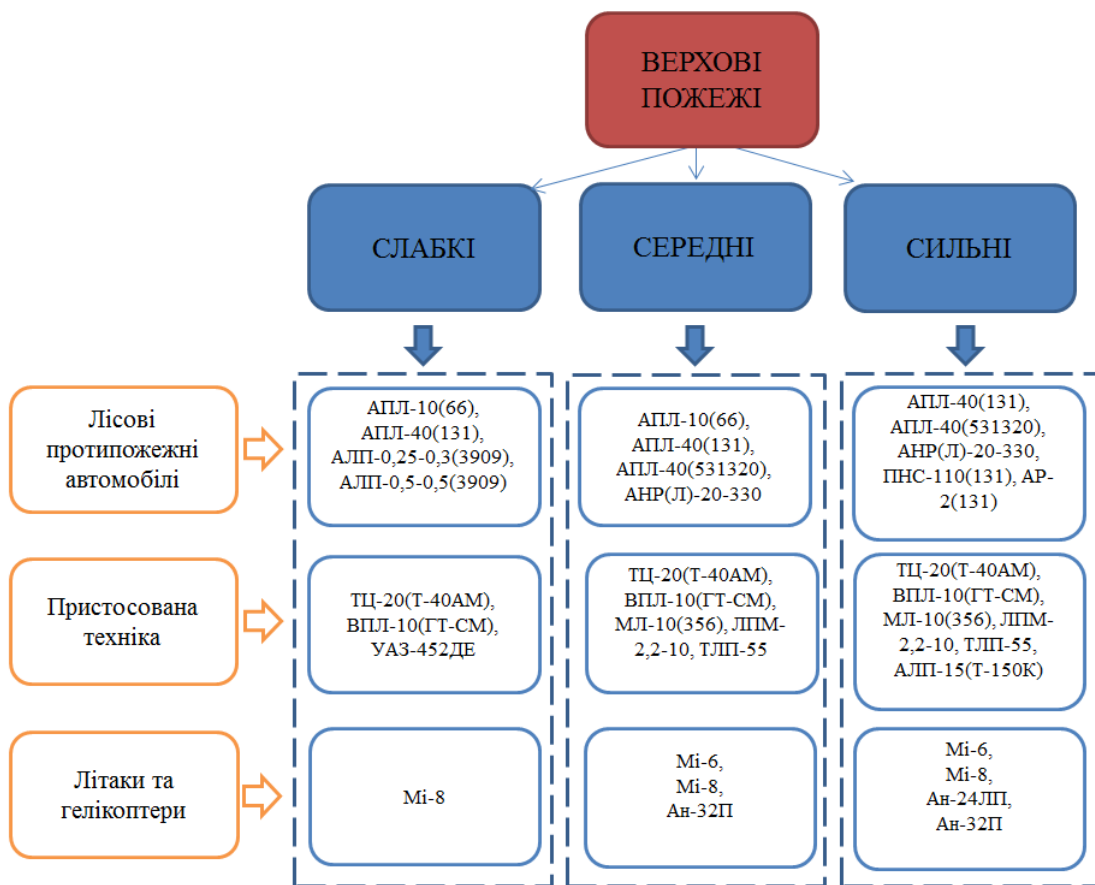


Рисунок 4.28 – Логістичний ланцюг залучення протипожежної техніки для гасіння верхових пожеж

Пересувна пожежна техніка (пожежні автомобілі тощо) повинна утримуватись у приміщеннях з твердим покриттям підлоги, обладнаних системами освітлення, опалення і телефонним зв'язком, іншими пристроями та обладнаннями, що необхідні для забезпечення нормальних і безпечних умов робіт.

Протягом пожежонебезпечного періоду пожежна техніка повинна бути у постійній готовності до виїзду на пожежу: бути справною, мати повний комплект придатного до застосування протипожежного обладнання та інвентарю, заправлена паливом, мастильними матеріалами, забезпечена запасом вогнегасних речовин. Використання пожежної техніки, у тому числі пожежного обладнання, інвентарю та інструментів, для господарських, виробничих та інших потреб, що не пов'язані з пожежогасінням, не дозволяється.

Пожежні машини та інша протипожежна техніка періодично повинні проходити технічне обслуговування згідно з вимогами, встановленими експлуатаційною документацією. Про перевірку стану агрегатів із запуском двигуна необхідно робити запис у спеціальному журналі, який зберігається у приміщенні, де встановлена ця техніка. За кожним пожежним автомобілем та мотопомпою, пристосованою (переобладнаною) для мети пожежогасіння технікою, слід закріплювати водія (моториста), який пройшов спеціальну підготовку. На пожежні машини та мотопомпи повинні бути визначені пожежні команди. На лісогосподарському підприємстві повинен бути відпрацьований порядок направлення і прибуття техніки на місце пожежі. На випадок гасіння великих лісових пожеж створюються об'єктові і відомчі резерви паливно-мастильних матеріалів і інших матеріальних ресурсів (канати сталеві, шини автомобільні, бензопили і запасні частини до них, електроди зварювальні тощо), а також пункти зосередження протипожежного інвентарю.

Усі лісові пожежні станції і пожежні автомашини повинні бути забезпечені медикаментами і необхідним медичним обладнанням [101].

4.8. Висновки до Розділу 4

1. Встановлено, що коефіцієнт кореляції між значеннями комплексного показника пожежної небезпеки Нестерова із показниками вологості брусків розробленого «Приладу для визначення пожежної небезпеки в лісових масивах та природних екосистемах за умовами погоди» високий від'ємний та становить - 0,7914. Тобто, при збільшенні комплексного показника – вологість знижується. Розроблений прилад можна використовувати для прогнозування пожежної небезпеки в лісових масивах та природних екосистемах.
2. Для обмеження поширення вогню під час лучних пожеж слід влаштовувати протипожежні бар'єри (розриви). Встановлено, що мінімальна ширина протипожежного бар'єру (мінералізованої смуги) для обмеження поширення лучних пожеж становить 0,56 м, максимальна – 1,28 м.
3. Встановлено, що відстань від фронту лучної пожежі до місця створення перешкоди повинна становити ≥ 286 м з метою безпеки особового складу пожежників.
4. При збільшенні швидкості вітру від 1 м/с до 15 м/с дальність розлітання іскор та продуктів піролізу від осередку горіння лучної рослинності становитиме 907,4 м.
5. Результати лабораторних досліджень температури займання та самозаймання брусків деревних видів показали, що найменш термостійкою є сосна звичайна. Температура займання склала +245 °C, самозаймання – +455 °C. Найвищими температурами займання і самозаймання деревини охарактеризовано граб звичайний ($T_z = +270$ °C, $T_{cz} = +475$ °C) і дуб звичайний ($T_z = +285$ °C, $T_{cz} = +465$ °C). Береза повисла і клен гостролистий мають середні показники серед досліджуваних видів.
6. Встановлено, що найнижчий ступінь обвуглювання має дуб звичайний, який протягом 10 хв прогорів на 38 мм (при товщині колоди 124 мм). Такі породи як граб звичайний та клен гостролистий повністю перегоріли за 10 хв (при діаметрах 129 мм та 140 мм відповідно). В умовах Українського Розточчя формування

пожежостійких узлісь слід передбачити за участю дуба звичайного і граба звичайного, які займаються та самозаймаються при вищих температурах, ніж інші види дерев.

7. Здійснено моделювання швидкості поширення фронту лучної пожежі в досліджуваному регіоні з врахуванням різної вологості горючого матеріалу (лучної рослинності), швидкості вітру та коефіцієнтів k і C та часу гасіння (хв) крайки лучної пожежі довжиною від 1 до 3000 м за допомогою 6-ти пожежників (1 відділення) та 13-ти пожежників (2 відділення).

8. У результаті створення логістичних ланцюгів залучення протипожежної техніки для гасіння пожеж у природних екосистемах (лісових і лучних пожеж) запропоновано три варіанти: гасіння торфовищ, гасіння верхових пожеж, гасіння низових пожеж. Комплексне використання пристосованих транспортних засобів із автомобілями пожежними лісовими, функціональні можливості яких не дозволяють виконати ряд додаткових робіт, забезпечує більшу ефективність гасіння лісових та лучних пожеж, торфовищ.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі, яка є завершеною науковою працею, розв'язане актуальне науково-технічне завдання – досліджено процеси розвитку лучних пожеж в природних екосистемах та встановлено вплив їх небезпечних чинників на довкілля і біоту, а також розроблено параметри протипожежних перешкод у вигляді мінералізованих смуг.

1. Видовий склад постпірогенної сукцесії на досліджуваній експериментальній ділянці збіднений (5 родин), а на території самого згарища спостерігається розсіяність рослин та спонтанне розташування в угрупованнях. Найбільшою родиною є *Asteraceae* – 7 видів (59%), *Rubiaceae* представлено 2 видами (17%), *Roaceae*, *Primulaceae*, *Apiaceae* – по 1 виду (8%). Родина *Asteraceae* характеризується нижчою горючістю, аніж *Roaceae*, яка в пірогенній сукцесії представлена лише одним видом.

2. Розрахунково встановлено, що ймовірність виникнення найбільшої кількості пожеж у природних екосистемах в межах західних областей України (Західного Лісостепу) характерне для Львівської області – 178,72 пожеж на 1 млн. га.

3. Експериментально встановлено, що температура полум'я під час горіння лучної рослинності в початковий момент часу становила $+66,7^{\circ}\text{C}$. У процесі горіння, через 20 секунд, температура полум'я сягнула $+352,5^{\circ}\text{C}$, максимальною температура полум'я була $+715,7^{\circ}\text{C}$ після вигорання всього горючого матеріалу (через 2,5 хв після початку дослідів).

4. Встановлено, що на ділянках з найвищими температурами полум'я, ($>940\text{ K}$), розрахована густина теплового потоку є значно вищою табличного значення критичної густини теплового потоку для досліджуваного матеріалу. Така ситуація потребує влаштування протипожежних бар'єрів та розробки низки пожежно-профілактичних заходів щодо недопущення лучних пожеж (запобігання спалювання сухої трави, стерні, навмисних підпалів порубкових решток тощо).

5. Моделювання у програмному середовищі WFDS надало можливість встановити параметри пожежонебезпечності, зокрема температури полум'я та потужності тепловиділення від лучної пожежі. Максимальна потужність теплового випромінювання від полум'я досліджуваної ділянки досягається на 65 с і становить 209650 кВт/м^3 , починаючи з 66 с, це значення спадало.
6. Потужність еквівалентної дози фотонного іонізуючого випромінювання у місцях горіння лучної рослинності становила $0,11 \text{ мкЗв/год.}$ та не перевищувала гранично-допустимі концентрації. Встановлено, що найвища питома активність радіонуклідів K 40, Ra 226, Th 232 притаманна досліджуваній ділянці, де процеси горіння спостерігалися за 1,5 роки до початку проведення експерименту і досліджуваній ділянці з модельним вогнищем.
7. Встановлено, що на досліджуваних ділянках, які піддавалися впливу вогню раніше за час проведення експерименту, показники кислотності та засоленості відповідають фоновим значенням та є значно нижчими від тих же значень для модельного вогнища.
8. Під час вивчення впливу низових лісових пожеж на концентрацію рухомих форм важких металів у різних ґрунтових генетичних горизонтах встановлено, що найвища концентрація спостерігається у верхніх шарах, окрім ділянки, яка зазнала пірогенного впливу за 3,5 роки до початку проведення моніторингу. Тобто, екологічне відновлення території відбувається на 3-4 рік після пірогенного чинника.
9. Розроблено «Прилад для визначення пожежної небезпеки в лісових масивах та природних екосистемах за умовами погоди» під час випробування якого встановлено співвідносність із розрахунками комплексного показника пожежної небезпеки. Коефіцієнт кореляції між значеннями комплексного показника пожежної небезпеки із показниками вологості брусків «Приладу для визначення пожежної небезпеки в лісових масивах та природних екосистемах за умовами погоди» високий від'ємний та становить $-0,7914$. Тобто, при збільшенні комплексного показника – вологість знижується. Таким чином, розроблений

прилад можна використовувати для прогнозування пожежної небезпеки в лісових масивах та природних екосистемах.

10. Розрахунково встановлено що мінімальна ширина протипожежного бар'єру (мінералізованої смуги) для обмеження поширення лучних пожеж становить 0,56 м, максимальна – 1,28 м. Відстань від фронту лучної пожежі до місця створення перешкоди повинна становити ≥ 286 м з метою безпеки особового складу рятувальників. При збільшенні швидкості вітру від 1 м/с до 15 м/с дальність розлітання іскор та продуктів піролізу від осередку горіння лучної рослинності становить $\leq 907,4$ м.

11. Експериментально встановлено що при висоті 0,1 м сухої лучної рослинності, за умови виникнення лучної пожежі, висота полум'я досягає 0,65 м. При висоті 0,2 м сухої лучної рослинності, за умови виникнення лучної пожежі, висота полум'я досягає 0,75 м. Відповідно – при 0,3 м – висота полум'я 1,3 м; при 0,4 м – висота полум'я 1,6 м; при 0,5 м – висота полум'я 1,7 м. Ці дані слід враховувати пожежно-рятувальним підрозділам ДСНС України під час гасіння лучних пожеж.

12. Здійснено моделювання швидкості поширення фронту лучної пожежі в досліджуваному регіоні з врахуванням різної вологості горючого матеріалу (лучної рослинності), швидкості вітру та коефіцієнтів k і C та часу гасіння (хв) крайки лучної пожежі довжиною від 1 до 3000 м за допомогою 6-ти рятувальників (1 відділення) та 13-ти рятувальників (2 відділення).

13. Результати лабораторних досліджень температури займання та самозаймання зразків деревини показали, що найменш термостійкою є сосна звичайна (температура займання склала $T_z = +245$ °С, самозаймання – $T_{cz} = +455$ °С). Найвищими температурами займання і самозаймання деревини охарактеризовано граб звичайний ($T_z = +270$ °С, $T_{cz} = +475$ °С) і дуб звичайний ($T_z = +285$ °С, $T_{cz} = +465$ °С). Встановлено, що найнижчий ступінь обвуглювання має дуб звичайний, який протягом 10 хв прогорів на 38 мм (при товщині колоди 124 мм). В умовах Українського Розточчя формування пожежостійких узлісь слід

передбачити за участю дуба звичайного і граба звичайного, які займаються та самозаймаються при значно вищих температурах, аніж інші види дерев.

14. У результаті створення логістичних ланцюгів залучення протипожежної техніки для гасіння пожеж у природних екосистемах (лісових і лучних пожеж) запропоновано три варіанти: гасіння торфовищ, гасіння верхових пожеж, гасіння низових пожеж. Комплексне використання пристосованих транспортних засобів із автомобілями пожежними лісовими, функціональні можливості яких не дозволяють виконати ряд додаткових робіт, забезпечує більшу ефективність гасіння лісових та лучних пожеж, торфовищ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Agranat V., Perminov V. (2020). Mathematical Modeling of Wildland Fire Initiation and Spread. *Environmental Modelling & Software*. 125. 104640. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104640>
2. Alcasena F. J., Ager A. A., Salis M., Day M. A., Vega-Garcia C. (2018). Optimizing prescribed fire allocation for managing fire risk in central Catalonia. *Science of The Total Environment*. 621. 872-885. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.297>
3. Aminia E., Safdaria M.-S., Weiseb D. R., Fletcher T. H. (2019). Pyrolysis kinetics of live and dead wildland vegetation from the Southern United States. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 142. 104613. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.05.002>
4. Antonio G.T. Biochemical changes in the kidneys after perinatal intoxication with lead and or cadmium and their antagonistic effects when coadministered Ecotoxicol Environ Saf / G. Antonio, L. Corredor. 2004. 57 (2). 184-189.
5. Arganaraz J.P., Radeloff V.C., Bar-Massada A., Gavier-Pizarro G.I., Scavuzzo C.M., Bellis L.M. (2017). Assessing wildfire exposure in the Wildland-Urban Interface area of the mountains of central Argentina. *Journal of Environmental Management*. 196. 499-510. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.058>
6. Asotskyi V., Buts Y., Kraynyuk O., Ponomarenko R. (2018). Post-pyrogenic changes in the properties of grey forest podzolic soils of ecogeosystems of pine forests under conditions of anthropogenic loading. *Journ.Geol.Geograph.Geoecology*. 2018. №27(2). 175-183.
7. Bai Y., Zhou Y., He H. (2020). Effects of rehabilitation through afforestation on soil aggregate stability and aggregate-associated carbon after forest fires in subtropical China. *Geoderma*. 376. 114548. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114548>
8. Barbier O. Effect of heavy metals on, and handling by, the kidney / O. Barbier, G. Jacquillet, M. Tauc, M. Cougnon, P. Poujeol // *Nephron Physiol*. 2005. 99 (4). 105-110. <https://doi.org/10.1159/000083981>

9. Bartolomea C., Princevaca M., Weiseb D. R., Mahalingamc S., Ghasemiana M., Venkatrama A., Vua H., Aguilar G. (2019). Laboratory and numerical modeling of the formation of superfog from wildland fires. *Fire Safety Journal*. 106. 94-104. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.04.009>
10. Bento-Gonçalves A., Vieira A., Úbeda X., Martín D. (2012). Fire and soils: Key concepts and recent advances. *Geoderma*. 191. 3-13. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.01.004>
11. Beverly J. L., McLoughlin N. (2019). Burn probability simulation and subsequent wildland fire activity in Alberta, Canada – Implications for risk assessment and strategic planning. *Forest Ecology and Management*. 451. 117490. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117490>
12. Boerner R.E.J., Brinkman J. A. (2003). Fire frequency and soil enzyme activity in southern Ohio oak-hickory forests. *Applied Soil Ecology*. 23. 137-146. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(03\)00022-2](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(03)00022-2)
13. Buraczyński J. Funkcjonowanie chronionych obiektów przyrodniczych na Roztoczu. Проблеми і перспективи розвитку природоохоронних об'єктів на Розточчі: Матеріали міжнар. наук. - практ. конф. (с. Шкло, 6–7 липня 2000 р.). Львів: Логос, 2000. С. 76-80.
14. Cardil A., Monedero S., Ramírez J., Silvac C. A. (2019). Assessing and reinitializing wildland fire simulations through satellite active fire data. *Journal of Environmental Management*. 231. 996-1003. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.115>
15. Cascio W. E. (2018). Wildland fire smoke and human health. *Science of The Total Environment*. 624. 586-595. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.086>
16. Davey J. C., Bodwell J. E., Gosse J. A. et al. Arsenic as an endocrine disruptor: effects of arsenic on estrogen mediated gene expression in vivo and in cell culture. *Toxicol. Sci.* 2007. Vol. 98. 75—86.
17. De Gennaro M., Billaud Y., Pizzo Y., Garivait S., Loraud J.-C., El Hajj M., Porterie B. (2017). Real-time wildland fire spread modeling using tabulated flame properties. *Fire Safety Journal*. 91. 872-881. <http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.03.006>

18. DeBano L.F. (2000). The role of fire and soil heating on water repellency in wildland environments: a review. *Journal of Hydrology*. 231-232. 195-206.
[https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00194-3](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00194-3)
19. Drach K.L., Kuzyk A.D., Tovarianskyi V.I., Yemelianenko S.O. (2020). Fire dangerous properties of the most common plants of grass ecosystems in Ukraine. *Ecologia Balkanica*. 12 (1). 147–154.
20. Dzwonko Z., Loster S., Gawronski S. (2015). Impact of fire severity on soil properties and the development of tree and shrub species in a Scots pine moist forest site in southern Poland. *Forest Ecology and Management*. 342. 56-63.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2015.01.013>
21. Efthimiou N., Psomiadis E., Panagos P. (2020). Fire severity and soil erosion susceptibility mapping using multi-temporal Earth Observation data: The case of Mati fatal wildfire in Eastern Attica, Greece. *Catena*. 187. 104320.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104320>
22. Fann N., Alman B., Broome R. A., Morgan G. G., Johnston F. H., Pouliot G., Rappold A. G. (2018). The health impacts and economic value of wildland fire episodes in the U.S.: 2008–2012. *Science of The Total Environment*. 610-611. 802-809.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.024>
23. Fernandez-Pello A. C. (2017). Wildland fire spot ignition by sparks and firebrands. *Fire Safety Journal*. 91. 2-10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.04.040>
24. Fitch R. A., Kim Y. S., Waltz A. E. M., Crouse J. E. (2018). Changes in potential wildland fire suppression costs due to restoration treatments in Northern Arizona Ponderosa pine forests. *Forest Policy and Economics*. 87. 101-114.
<https://doi.org/10.1016/j.forpol.2017.11.006>
25. Fontúrbel M.T., Barreiro A., Vega J.A., Martín A., Jiménez E., Carballas T., Fernández C., Díaz-Raviña M. (2012). Effects of an experimental fire and post-fire stabilization treatments on soil microbial communities. *Geoderma*. 191. 51-60.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.01.037>
26. Francos M., Stefanuto E.B., Úbeda X., Pereira P. (2019). Long-term impact of prescribed fire on soil chemical properties in a wildland-urban interface. *Northeastern*

Iberian Peninsula. *Science of The Total Environment*. 689. 305-311.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.434>

27. Gapalo A., Popovych V. Environmental hazard of burning dry grass and grassland vegetation. *Ecological impact of fire. Deforestation and forest degradation. Reclamation of devastated landscapes: The second round table (Lviv, March 29, 2019)*. 2019. P. 7-9.

28. García-Orenes F., Arcenegui V., Chrenková K., Mataix-Solera J., Moltó J., Jara-Navarro A.B., Torres M.P. (2017). Effects of salvage logging on soil properties and vegetation recovery in a fire-affected Mediterranean forest: a two year monitoring research. *Science of the Total Environment*.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.090>

29. Gómez-Rey M. X., Couto-Vázquez A., García-Marco S., González-Prieto S. J. (2013). Impact of fire and post-fire management techniques on soil chemical properties. *Geoderma*. 195-196. 155-164. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.12.005>

30. Holsinger L., Parks S. A., Miller C. (2016). Weather, fuels, and topography impede wildland fire spread in western US landscapes. *Forest Ecology and Management*. 380. 59-69. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2016.08.035>

31. Huang X., Rein G. (2019). Upward-and-downward spread of smoldering peat fire. *Proceedings of the Combustion Institute*. 37. 4025-4033.
<https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.05.125>

32. Jiménez-Morillo N. T., Almendros G., De la Rosa J. M., Jordán A., Zavala L. M., Granged A. J. P., González-Pérez J. A. (2020). Effect of a wildfire and of post-fire restoration actions in the organic matter structure in soil fractions. *Science of the Total Environment*. 728. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138715>

33. Jolly W. M., Hintz J., Linn R. L., Kropp R. C., Conrad E. T., Parsons R. A., Winterkamp J. (2016). Seasonal variations in red pine (*Pinus resinosa*) and jack pine (*Pinus banksiana*) foliar physio-chemistry and their potential influence on stand-scale wildland fire behavior. *Forest Ecology and Management*. 373. 167-178.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2016.04.005>

34. Khakzad N. (2019). Modeling wildfire spread in wildland-industrial interfaces using dynamic Bayesian network. *Reliability Engineering & System Safety*. 189. 165-176. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.04.006>
35. Kutiel P., Lavee H., Segev M., Benyamini Y. (1995). The effect of fire-induced surface heterogeneity on rainfall-runoff-erosion relationships in an eastern Mediterranean ecosystem, Israel. *Catena*. 25. 77-87. [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(94\)00043-E](https://doi.org/10.1016/0341-8162(94)00043-E)
36. Lautenberger C. (2017). Mapping areas at elevated risk of large-scale structure loss using Monte Carlo simulation and wildland fire modeling. *Fire Safety Journal*. 91. 768-775. <http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.04.014>
37. Madsen R. S., Haynes H. J.G., McCaffrey S. M. (2017). Wildfire risk reduction in the United States: Leadership staff perceptions of local fire department roles and responsibilities. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 27. 451-458. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2017.11.009>
38. Marchand A., Ferriere S., Collin A., Boulet P., Acem Z., Demeurie F., Morel J.-Y. (2019). Vegetation fire spread database: 85 wood wool shaving experiments at laboratory scale. *Fire Safety Journal*. 109. 102870. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.102870>
39. Meerpoel-Pietri, K., Tihay-Felicelli, V., Graziani, A., Santoni, P. A., Morandini, F., Perez-Ramirez, Y., ... & Mell, W. (2022). Modeling with WFDS Combustion Dynamics of Ornamental Vegetation Structures at WUI: Focus on the Burning of a Hedge at Laboratory Scale. *Combustion Science and Technology*, 1-31.
40. Monedero S., Ramirez J., Cardil A. (2019). Predicting fire spread and behaviour on the fireline. *Wildfire analyst pocket: A mobile app for wildland fire prediction*. *Ecological Modelling*. 392. 103-107. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.11.016>
41. Moon K., Duff T.J., Tolhurst K.G. (2016). Sub-canopy forest winds: understanding wind profiles for fire behaviour simulation. *Fire Safety Journal*. 105. 320-329. <http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2016.02.005>
42. Morgan J. Hurley. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Fifth Edition. Society of Fire Protection Engineers 2016. 3493.

43. Mueller E. V., Skowronski N., Clark K., Gallagher M., Kremens R., Thomas J. C., El Houssami M., Filkove A., Haddena R. M., Mellg W., Simeonih A. (2017). Utilization of remote sensing techniques for the quantification of fire behavior in two pine stands. *Fire Safety Journal*. 91. 845-854. <http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.03.076>
44. Nam D.H. Monitoring for Pb and Cd pollution using feral pigeons in rural, urban, and industrial environments of Korea / D.H. Nam, D.P. Lee // *Sci. Total Environ.* – 2006. – Vol. 15. – 357 (1-3). – Pp. 288-295.
45. Patrick j. Haley, George m. Shopp, Janet m. Benson, Yung-Sung Cheng, David e. Bice, Michael i. Luster, June k. Dunnick, Charles h. Hobbs. The Immunotoxicity of Three Nickel Compounds following 13-Week Inhalation Exposure in the Mouse, *Toxicological Sciences*, 15(3), 1990, 476–487, <https://doi.org/10.1093/toxsci/15.3.476>
46. Perez-Quezada J. F., Urrutiaa P., Olivares-Rojas J., Meijide A., Sánchez-Cañete E. P., Gaxiola A. (2020). Long term effects of fire on the soil greenhouse gas balance of an old-growth temperate rainforest. *Science of the Total Environment*. 755. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142442>
47. Phillips C.J. The effects of cadmium in feed, and its amelioration with zinc, on element balances in sheep / C.J. Phillips, P.C. Chiy, H.M. Omed // *J. Anim. Sci.* 2004. 82 (8). 2489-2502.
48. Pingree M. R. A., Kobziar L. N. (2019). The myth of the biological threshold: A review of biological responses to soil heating associated with wildland fire. *Forest Ecology and Management*. 432. 1022-1029. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.10.032>
49. Popovych, V., Gapalo, A. Monitoring of Ground Forest Fire Impact on Heavy Metals Content in Edafic Horizons. *Journal of Ecological Engineering*, 22(5), 2021. 96-103. <https://doi.org/10.12911/22998993/135872>
50. Popovych, V., Gapalo, A., Shukel, I., Renkas, A. Logistic chains of application of firefighting equipment for suppression of forest and natural ecosystems fires. *SGEM 2020: 20th International Scientific GeoConference (Albena, 18 – 24 August, 2020)*.

2020. 20(5.1). P. 499-506. <https://doi.org/10.5593/sgem2020/5.1/s20.063> (індексується в *Scopus*).

51. Popovych, V., Gapalo, A., Tovarianskyi, V. Investigation of Fires in Natural Ecosystems of the Ukrainian Roztochchiya by Wildland Fire Dynamics Simulator Model. *Ecological Engineering and Environmental Technology*, 24(3), 2023. 36-42. <https://doi.org/10.12912/27197050/159576>

52. Popovych, V., Henyk, Y., Gapalo, A., Bosak, P., Popovych, N. Specific Activity of Radionuclides in Soils Disturbed by Forest Fires. *Journal of Ecological Engineering*, 23(6), 2022. 265–270. <https://doi.org/10.12911/22998993/148191>

53. Roztocze. Środowisko przyrodnicze / pod red. J. Buraczyńskiego. Lublin: Wydawnictwo Lubelskie, 2002. 341.

54. Sánchez-Monroya X., Mellb W., Torres-Arenasa J., Butlerc B.W. (2019). Fire spread upslope: Numerical simulation of laboratory experiments. *Fire Safety Journal*. 102844. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.102844>

55. Smits K. M., Kirby E., Massman W. J., Bagget L. S. (2016). Experimental and Modeling Study of Forest Fire Effect on Soil Thermal Conductivity. *Pedosphere*. 26(4). 462-473. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(15\)60057-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(15)60057-1)

56. Soto B., Diaz-Fierros F. (1998). Runoff and soil erosion from areas of burnt scrub: comparison of experimental results with those predicted by the WEPP model. *Catena*. 31. 257-270. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(97\)00047-7](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(97)00047-7)

57. Tang W., Gorham D. J., Finney M. A., Mcallister S., Cohen J., Forthofer J., Gollner M. J. (2017). An experimental study on the intermittent extension of flames in winddriven fires. *Fire Safety Journal*. 91. 742-748. <http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.03.030>

58. Tang W., Miller C. H., Gollner M. J. (2017). Local flame attachment and heat fluxes in wind-driven line fires. *Proceedings of the Combustion Institute*. 36. 3253-3261. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proci.2016.06.064>

59. Timothy A. D., Moses I., Johnstone K., Nekesa O. A. (2017). Effects of wildland fire on the tropical alpine moorlands of Mount Kenya. *Catena*. 149. 300-308. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2016.10.003>

60. Tomashek A. Vierter Beitrag zur Flora der Umgebung Lemberg. Verh. zool. botan. Gesellsch. 1862. Vol. 12. pp. 869-966.
61. Trauernicht C. (2019). Vegetation—Rainfall interactions reveal how climate variability and climate change alter spatial patterns of wildland fire probability on Big Island, Hawaii. Science of The Total Environment. 650. 459-469. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.347>
62. Ulery A. L., Graham R. C., Goforth B. R., Hubbert K. R. (2017). Fire effects on cation exchange capacity of California forest and woodland soils. Geoderma. 286. 125-130. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.10.028>
63. User Guide to WFDS – this is a work in progress. URL: https://www.fs.fed.us/pnw/fera/wfds/wfds_user_guide.pdf (дата звернення: 04.08.2022).
64. Vilà-Vilardella L., Keeton W. S., Thomb D., Gyeltshend C., Tshering K., Gratzera G. (2020). Climate change effects on wildfire hazards in the wildland-urban-interface – Blue pine forests of Bhutan. Forest Ecology and Management. 461. 117927. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.117927>
65. Wittenberg L., Hilde van der Wal, Keesstra, S., Tessler N. (2020). Post-fire management treatment effects on soil properties and burned area restoration in a wildland-urban interface, Haifa Fire case study. Science of The Total Environment. 716. 135190. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135190>
66. Wood C. M., Farrell A. P., Brauner C. J. Homeostasis and toxicology of essential metals. London ; Waltham ; San Diego : Academic Press, 2012. 298—348.
67. Wuthrich C., Schaub D., Weber M., Marxer P., Conedera M. (2002). Soil respiration and soil microbial biomass after a fire in a sweet chestnut forest in southern Switzerland. Catena. 48. 201-215. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(01\)00191-6](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(01)00191-6)
68. Xieshang Y., Naian L., Xiaodong X., Domingos X. V. (2020). Physical model of wildland fire spread: Parametric uncertainty analysis. Combustion and Flame. 217. 285-293. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.03.034>
69. Young J. D., Thode A. E., Huang C.-H., Ager A. A., Fulé P. Z.. (2019). Strategic application of wildland fire suppression in the southwestern United States. Journal of

- Environmental Management. 245. 504-518.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.003>
70. Азаров С. І., Шевченко Р. І., Щербак С. С. (2020). Експериментальні дослідження екологічного впливу на довкілля внаслідок лісової пожежі в складних радіаційних умовах утворення пожежного навантаження. Комунальне господарство міст. 1. 154. 333-338. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2020-1-154-333-338>
71. Азаров С., Єременко С., Сидоренко В. (2018). Весняний період – початок пожежонебезпечного сезону. Надзвичайна ситуація. 4(10). 18-20.
72. Безділь Р. В., Пушкарьова-Безділь Т. М., Щетина М. А. Вміст важких металів у відходах кролеферми та їх екологічно безпечна утилізація. Науковий вісник НЛТУ України. – 2016. – Вип. 26.1. 162-170.
73. Блінкова О. І., Пашкевич Н. А., Козинятко Т. А. Екологічні особливості деградації лісових торфовищ під впливом пожеж. Науковий вісник НЛТУ України. 2012. №22 (10). 105-112.
74. Бонішко О. С. Депонування та розподіл катіонів у темно-сірих опідзолених ґрунтах Малехівського пасма в умовах їх постпірогенної деградації. Вісник ОНУ. Сер.: Географічні та геологічні науки. 2016. №21, 2. 149-158.
75. Бумар Г. Й. Результати багаторічного популяційного моніторингу рідкісних видів рослин в поліському природному заповіднику. Моніторинг та охорона біорізноманіття в Україні : Рослинний світ та гриби / Серія: «Conservation Biology in Ukraine». Вип. 16. Т. 1. 2020. 25-34.
76. Бут В. П., Куціций Л. Б., Болібрux Б. В. Практичний посібник з пожежної тактики. Сполум. 2003. 122.
77. Буц Ю. В. Динаміка ландшафтних пожеж в Україні та еколого-економічні наслідки їх виникнення. Вісник ОНУ. Сер.: Географічні та геологічні науки. 2013. 2(18). 111-117.
78. Буц Ю. В. Наслідки впливу пірогенного чинника на біогеохімічні властивості екогеосистем в умовах техногенного навантаження. Науковий вісник будівництва. 2018. №93,3. 115-122.

79. Буц Ю. В. Наслідки впливу пірогенного чинника на властивості ґрунтового покриву борової тераси річки Уди. Науковий вісник Чернівецького університету. Географія. 2013. №655. 16-19.
80. Буц Ю. В. Про математичне моделювання пожеж в природних екосистемах. Людина та довкілля. Проблеми неоекології. № 3-4, 2012. 17-22.
81. Буц Ю. В., Крайнюк О. В., Діденко Н. В., Барбашин В. В. Рекомендації щодо забезпечення екологічної безпеки при відновленні екосистем після пожежі. Вісник ХНУ імені В. Н. Каразіна серія «Екологія». 2020. 23. 41-49.
82. Витрикуш Н.М., Параняк Н.М., Дацько О.С., Романів А.С., Чайка О.Г. Аналіз розподілу та впливу природних надзвичайних ситуацій за регіонами. Молодий вчений. 2020. 10 (86). 1-7.
83. Ворон В. П. Наукові основи діагностики антропогенного пошкодження лісових екосистем. Лісовий журнал. 2011. 1. 24-28.
84. Ворон В. П., В. Г. Борисенко, О. М. Ткач, В. К Мунтян, І. О. Барабаш. Параметри горіння підстилки соснових лісів українського полісся. Лісівництво і агролісомеліорація. Харків: УкрНДІЛГА, 2016. Вип. 129. С. 130-138.
85. Ворон В. П., Мельник Є. Є., & Сидоренко С. Г. Діагностика пошкодження стовбурів сосни при низових пожежах. Науковий вісник НЛТУ України. 2012. 22 (10). 64-68.
86. Ворон В. П., Ткач О. М., & Сидоренко С. Г. Особливості пошкодження сосняків пожежами в Поліссі. Науковий вісник НЛТУ України. 2014. 24(10). 45-50.
87. Ворон В. П., Ткач О. М., Сидоренко С. Г. (2014). Тенденції у післяпожежному розвитку сосняків Рівненщини. Лісівництво і агролісомеліорація. 125. 181–187.
88. Гайдін А. М., Собко Б. Ю. (2018). Гідроекологія при гірничих роботах: монографія. Дніпро: «Літограф». 218.
89. Гапало А. І. Особливості виникнення ландшафтних пожеж у Львівській області. *Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності:*

Зб. наук. праць XIII Міжнар. наук.-практ. конф. молодих вчених, курсантів та студентів (м. Львів, 22-23 березня 2018 р.). 2018. С. 153-154.

90. Гапало А. І. Еколого-пірологічна небезпека спалювання лучної рослинності. *Проблеми екологічної безпеки: Матер. XV Міжнар. наук.-техн. конф. (м. Кременчук, 11-13 жовтня 2017 р.). 2017. С. 22.*

91. Гапало А. І. Особливості виникнення та поширення низових лісових пожеж на території Львівської області. *Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи: Матер. III Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Львів, 14 вересня 2018 р.). 2018. С. 25.*

92. Гапало А. І., Попович В. В. Особливості розвитку та ліквідації лісових пожеж. *Актуальні питання техногенної та цивільної безпеки України: Матер. II Всеукр. наук. конф. (м. Миколаїв, 18-19 вересня 2020 р.). 2020. С. 135-136.*

93. Гаськевич В., Нецик М. (2010). Особливості рослинності пірогенно деградованих торфових ґрунтів Малого Полісся. *Вісник Львів. ун-ту. Серія геогр.* 2010. №38. 69–76.

94. Герговський О. І. Застосування радіокерованих роботів для ліквідації пожеж в екосистемах. *Матеріали Десятої Міжнародної наукової конференції студентів та молодих вчених «Сучасні інформаційні технології - 2020» «Modern Information Technology - 2020» (14-15 травня 2020 р., м. Одеса).* 183-184.

95. Геренчук К. І. *Природа Львівської області.* Львів: Вид-во Львів. ун-ту, 1972. 151 с.

96. Грицюк М. Ю., Лозинський О. І. (2011). Використання геоінформаційних технологій для виявлення підпалів сухої рослинності на карпатських полонинах. *Вісник ЛДУ БЖД.* 5.

97. Грицюк Ю. І., Рак Т. Є., Малець І. О. Особливості розв'язання задачі оптимального управління процесом ліквідації лісових пожеж. *Пожежна безпека* №17. 2010. 51-57.

98. Гродзінський А. М. *Лікарські рослини: Енциклопедичний довідник.* Київ, 1990. 544 с.

99. Гуменюк В. В. Природне поновлення насаджень сосни звичайної (*Pinus sylvestris* L.), пройдених низовими пожежами у регіоні Центрального Полісся України. Науковий вісник НЛТУ України. 2015. 25(5). 48-55.
100. Гуменюк В. В., Голяка Д. М., Зібцев С. В. Вплив низової пожежі на соснові деревостани у зоні Центрального Полісся України. Науковий вісник НЛТУ України. 2015. 25 (9). 41-49.
101. Гуменюк В. Створення пожежостійких узлісь в ДП "Остерський військовий лісгосп". 2021. <https://nubip.edu.ua/node/90580>
102. Гусак О. М. Інформаційна технологія раннього виявлення лісових пожеж. Вісник ЛДУ БЖД. 15. 2017. 33-38.
103. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. Додаток Д.
104. Державне агенство лісових ресурсів України. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://forest.gov.ua/napryamki-diyalnosti/lisove-gospodarstvo/ohorona-i-zahist-lisiv/ohorona-lisiv-vid-pozhezh>
105. Довідник керівника гасіння пожежі. За заг. ред. Кропивницького В. С. К.: ТОВ "Літера-Друк". 2016. 320.
106. Дрогомирецька І. З. Імунотоксичність нікелю та його сполук / І. З. Дрогомирецька, І. В. Мазепа, М. А. Мазепа // Современные проблемы токсикологии. – 2009. - № 3–4. – С. 25–31.
107. ДСТУ 4770.5:2007. Якість ґрунту. Визначення вмісту рухомих сполук кобальту в ґрунті в буферній амонійно-ацетатній витяжці з рН 4,8 методом атомно-абсорбційної спектрофотометрії.
108. Дубінін Д. П., Лісняк А. А., Титаренко А. В. Експериментальне дослідження ширини протипожежного бар'єру для локалізації природних пожеж. Проблемы пожарной безопасности. Выпуск 39, 2016. 94-99.
109. Заєць Р. А., Куліца О. С., Журбинський Д. А., Щіпець С. Д. Обґрунтування умов застосування технологій аеромоніторингу пожеж в природних екостистемах та на відкритих територіях. Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація. 2019. Том 3 № 2. 25-36.

110. Зібцев С. В., Миронюк В. В., Сошенський О. М., Корень М. С., Корень В. А. Просторово-часовий розподіл пожеж у природних ландшафтах Рівненської області. Науковий вісник НЛТУ України. 2019, т. 29, № 6. С. 18–23.
111. Зібцев С. В., Сошенський О. М., Миронюк В. В., Гуменюк В. В. Ландшафтні пожежі в Україні: поточна ситуація та аналіз чинної системи охорони природних територій від пожеж. Ukrainian journal of forest and wood science. 2020. 11(2). 15-31.
112. Зібцев С., Сошенський О. У Боярській лісовій дослідній станції продовжується створення протипожежного узлісся. 2021.
<https://nubip.edu.ua/node/90446>
113. Інформаційна довідка про Хмельницьку область. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.adm-km.gov.ua/?page_id=1501
114. Калиновський А. Я., Чуб І. А., Обіженко Т. М. Визначення геометричних характеристик ландшафтної пожежі з урахуванням неоднорідної вологості лісового пального матеріалу. Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил, 2015, випуск 2(43). 115-118.
115. Ковалишин В. В., Мовчан І. О. Модель створення безперервного протипожежного бар'єру для локалізації ландшафтної пожежі. Проблеми пожарной безопасности. Сборник научных трудов. Выпуск 37, 2015. 93-97.
116. Коваль С. І., Кот О. С. Пірогенні утворення на місті осушених згорівших торфових ґрунтів - їх властивості. Вісник інженерної академії України. 2012. №1. 229-232.
117. Ковальчук І., Петровська М. Геоєкологія Розточчя: монографія. Львів: Вид. центр ЛНУ ім. І. Франка, 2003. 192 с.
118. Крайнюк О. В., Буц Ю. В., Некос А. Н. Природна пожежа у Рівненському заповіднику та її аналіз. VinSmartEco. Збірник матеріалів І Міжнародної науково-практичної конференції (16-18 травня 2019, м. Вінниця, Україна). Вінниця: КВНЗ Вінницька академія неперервної освіти, 2019. 255-256.
119. Кузик А. Д. (2014). Пожежонебезпечні властивості лісових горючих матеріалів. Науковий вісник НЛТУ України. 24.4. 214-218.

120. Кузик А. Д. (2014). Рослини наземного яруса як фактор пожежної небезпеки лісових насаджень різних типів лісорослинних умов. Науковий вісник НЛТУ України. 24.7. Екологія та довкілля. 109-111.
121. Кузик А. Д. Вплив радіальних і латеральних потоків на пожежонебезпечні властивості лісового середовища. Науковий вісник НЛТУ України. 2013. 23(16). 116-124.
122. Кузик А. Д. Еколого-лісівничі основи пожежної безпеки лісів Малого Полісся: монографія. Львів : СПОЛОМ, 2019. 493.
123. Кузик А. Д. Моделювання пожежної небезпеки лісів. Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць. Львів : РВВ НЛТУ України. 2011. Вип. 21.16. С. 104–112.
124. Кузик А. Д. Пожежонебезпечні властивості лісових горючих матеріалів. Науковий вісник НЛТУ України – №24,4. – 2014 – С. 214–219.
125. Кузик А. Д. Про взаємний вплив лісових пожеж і ґрунтів. Науковий вісник НЛТУ України. 2009. №19 (4). 106-110.
126. Кузик А. Д. Умови та способи переходу низової пожежі у верхову. Науковий вісник НЛТУ України. 2010. 20(13). 103-108.
127. Кузик А. Д., Драч К. Л. Пожежна небезпека найпоширеніших трав'янистих рослин лук західної України /А. Д. Кузик, К. Л. Драч // Пожежна безпека – №29. – 2016 – С. 87–92.
128. Кузик А. Д., Карабин О. О. Особливості виникнення та поширювання лісової пожежі. Заповідна справа в Галичині, на Поділлі та Волині: наук. вісник. Львів: Вид-во УкрДЛТУ. 2004. 14.8. 438–442.
129. Кузик А. Д., Лагно Д. В. (2019). Особливості процесу ліквідації пожежі у забруднених радіонуклідами лісах на території зони відчуження. Пожежна безпека. №34. 47-53.
130. Кузик А. Д., Товарянський В. І. Математичне моделювання процесів кондуктивного і радіаційного теплообміну під час пожежі в соснових лісах. Пожежна безпека №30, 2017. 105-113.

131. Кузик А. Д., Товарянський В. І., Драч К. Л. Моделювання процесів виникнення і поширення пожеж у трав'яних екосистемах. Пожежна безпека. 2020. 36. 44-48.
132. Кузик, А. Д., Товарянський, В. І., & Драч, К. Л. (2019). Експериментальні дослідження пожеж у трав'яних екосистемах.
133. Кулаковська Т. В., Векленко Ю. А. Роль лукопасовищних угідь у вирішенні енергетичної проблеми в Європі. Сільськогосподарські науки. №1(57). 2012. 48–54.
134. Кучерявий В. П. (2003). Фітомеліорація. Львів: Світ. 540.
135. Кучерявий В. П. Урбоекологія : підручник [для студ. ВНЗ]. Львів: Світ, 1999. 360 с.
136. Кучерявий, В. П. (2010). Загальна екологія. Львів : Світ. 520.
137. Лагно Д. В., Кузик А. Д., Биченко А. О., Ножко І. О. Методи осадження радіоактивного пилу та хмари, під час гасіння низових пожеж в Чорнобильській зоні. Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація. 2020. Том 4 № 2. 35-41.
138. Ландін В. П., Тищенко О. Г., Гуреля В. В., Кучма Т. Л., Фещенко В. П. (2021). Вплив лісових пожеж на рослинний покрив радіоактивно забруднених територій. Agroecological Journal. 1. 68-80.
139. Лихочвор В., Демчишин А. Роль кальцію і магнію за інтенсивного землеробства. Пропозиція - головний журнал з питань агробізнесу. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://propozitsiya.com/ua/rol-kalciya-i-magniya-pri-intensivnom-zemledelii>
140. Маринич А. М. Природа Украинской ССР. Ландшафты и физико-географическое районирование : научно-популярная литература / ред. А. М. Маринич, В. М. Пащенко, П. Г. Шищенко. Київ: Наук. Думка, 1985. 224 с.
141. Медведєв В. В., Лактіонова Т. М. (1998). Земельні ресурси України. К.: Аграрна наука. 150.
142. Мислива Т. М. Свинець і кадмій у ґрунтах природних і агроландшафтів Житомирського Полісся. Вісник Житомирського національного агроекологічного університету, 2013, 1 (1): 36-49.

143. Мікосянчик О. О., Халмурадов Б. Д., Кічата Н. М., Набильська А. І. Організаційні аспекти застосування авіаційних сил для гасіння лісової пожежі. Системи управління, навігації та зв'язку. 2021. 1(63). 138-141.
144. Наказ Державного комітету Лісового господарства України від 27.12.2004 № 278 «Про затвердження Правил пожежної безпеки в лісах України».
145. Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 02.02.2005 року №54 «Про затвердження державних санітарних правил "Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України"».
146. Населення Чернівецької області за 2016 рік. [Електронний ресурс]. Режим доступу:
http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:IWEephD8Sa8J:www.cv.ukrstat.gov.ua/publiy/2016/migr/zb/zbirn_nasel_2016.pdf+&cd=5&hl=uk&ct=clnk&gl=ua
147. Обиход Г. О. Економіка пожеж у природних екосистемах. Економіка АПК. 2009. 14. 28-32.
148. Обіженко Т. М., Мовчан І. О., Бойко Т. В. Огляд нормативної бази з визначення ширини протипожежних бар'єрів для локалізації ландшафтних пожеж. Науковий вісник НЛТУ України. 2015. 25.5. 200-204.
149. Обіженко Т. М., Тарасенко О. А. Моделювання локалізації ландшафтної пожежі з використанням технічних засобів. Системи обробки інформації, 2015, випуск 5 (130). 189-191.
150. Офіційний сайт Державного агентства лісових ресурсів України. Електронний ресурс. Режим доступу:
http://dklg.kmu.gov.ua/forest/control/uk/publish/article?art_id=118927&cat_id=118926
151. Офіційний сайт Державної служби України з надзвичайних ситуацій. Оперативна інформація про надзвичайні ситуації техногенного, природного та іншого характеру на території України станом на 7 годин 1 травня 2020 року. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://www.dsns.gov.ua/ua/Dovidka-zadobu/107971.html>
152. Офіційний сайт Державної служби України з надзвичайних ситуацій. Оперативна інформація про надзвичайні ситуації техногенного, природного та

іншого характеру на території України станом на 7 годин 30 квітня 2020 року. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://www.dsns.gov.ua/ua/Dovidka-zadobu/107923.html>

153. Павличенко А.В., Демура В.І., Готвянська В.О. Розподіл та накопичення важких металів в рослинах та ґрунтах на територіях розміщення відходів вуглевидобутку. *Геотехнічна механіка: міжвід. зб. наук. праць. Ін-т геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. Дніпропетровськ*, 2013. 111. С. 23-29.

154. Павловська Т., Поручинська І., Поручинський В. Сучасна демографічна ситуація у Волинській області. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://konfgeolutsk.wordpress.com/2018/04/19/%D1%81%D1%83%D1%87%D0%B0%D1%81%D0%BD%D0%B0-%D0%B4%D0%B5%D0%BC%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D1%84%D1%96%D1%87%D0%BD%D0%B0-%D1%81%D0%B8%D1%82%D1%83%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%8F-%D1%83-%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D0%B8/>

155. Панас Р. М. (2012). Ґрунтознавство. Львів : «Новий світ-2000». 2012. 371.

156. Параняк Р.П. Шляхи надходження важких металів в довкілля та їх вплив на живі організми / Р.П. Параняк, Л.П. Васильцева, Х.І. Макух // Біологія тварин : зб. наук. праць. – 2007. – Т. 9, № 1-2. – С. 83-89.

157. Пархоменко Р. В., Болібрux Б. В., Рак Т. Є. Пожежна тактика. Практикум. Львів: Вид-во «Добра справа». 2008. 267.

158. Паспорт Львівської області. [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://database.ukrcensus.gov.ua/regionalstatistics/regiontree.files/asp_tables_uk/46.htm

159. Паспорт Тернопільської області. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://sed.te.gov.ua/main/ua/63.html>

160. Педан Л.Р. Профілактика впливу чинників навколишнього середовища на здоров'я за допомогою мікроелементу марганцю / Л.Р. Педан // Гігієна населених місць : зб. наук. праць. – 2013. – № 62. – С. 325-345.

161. Петровська М. А. Еколого-геоморфологічний аналіз Розточчя і прилеглої території: автореф. дис. канд. геогр. наук. Львів, 2001. 17 с.

162. Плаксієнко, І. Л., Кулик, М. І., Галицька, М. А., & Диченко, А. С. (2020). Екотоксикологічний аспект забруднення ґрунту свинцем та кадмієм. Збірник матеріалів II Міжнародної науково-практичної конференції «Екологічні проблеми навколишнього середовища та раціонального природокористування в контексті сталого розвитку» – 26 червня 2020, Полтава. С. 37-39.
163. Попович В. В., Гапало А. І. Важкі метали в поверхневому шарі едафотопу на постпірогенних територіях. *Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи: Матер. IV Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Львів, 26 березня 2021 р.).* 2021. С. 133-134.
164. Попович В. В., Гапало А. І. Вплив лісових пожеж на фізико-хімічні показники ґрунту. *Сучасний стан і перспективи розвитку ландшафтної архітектури, садово-паркового господарства, урбоекології та фітомеліорації: Матер. Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Львів, 4-5 квітня 2019 р.).* 2019. С. 289-290.
165. Попович В. В., Гапало А. І. Засоленість постпірогенних ґрунтів Українського Розточчя. Вісник ЛДУБЖД, №22, 2020. 12-17. <https://doi.org/10.32447/20784643.22.2020.02>
166. Попович В. В., Гапало А. І. Температурний вплив ландшафтних пожеж на екологічний стан едафотопу. *Zeszyty Naukowe SGSP*, 2020, Nr. 76/4/2020. 29-45. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.5977>
167. Попович В. В., Гапало А. І., Башинський О. І. Обвуглювання стовбурів листяних дерев під час лісових пожеж в межах Українського Розточчя. Пожежна безпека, №37, 2020. 58-63. <https://doi.org/10.32447/20786662.37.2020.09>
168. Правила пожежної безпеки в лісах України», затверджені Наказом ДК Лісового господарства України від 27.12.2004 р. №278.
169. Прогноз погоди. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.meteoprog.ua/ua/climate/Lviv/>
170. Рибак М. Лісові пожежі та їх вплив на навколишнє середовище. Актуальні питання техногенної та цивільної безпеки України» : Матеріали II Всеукраїнської наукової конференції. Миколаїв, 2020. 86-87.

171. Рибалова О. В., Белан С. В. Заходи щодо зменшення впливу лісових пожеж на екологічний стан малих річок. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Экология. 2011. 6/8 (54). 52-56.
172. Рибалова О. В., Бригада О. В., Сарапіна М. В., Коробкіна К. М. Забруднення ґрунтів внаслідок лісових пожеж. The 6th International scientific and practical conference "Perspectives of world science and education" (February 26-28, 2020) CPN Publishing Group, Osaka, Japan. 2020. 711-718.
173. Рибалова О.В., Бригада О.В., Коробкіна К.М., Крайнюков О.М., Мірошніченко І.М. Визначення небезпеки впливу лісових пожеж на якісний стан ґрунтів. Науковий вісник будівництва, 2019, Т.2, № 2(96). 413-422.
174. Симканич О.І., Делеган-Кокайко С.В., Глух О.С., Мірутенко В.В., Сухарев С.М. (2016). Вивчення впливу спалювання сухої рослинності на хімічні та біологічні показники ґрунту. Наук. вісник Ужгород. ун-ту (Сер. Хімія). 2 (36).
175. Смотр О. О., Грицюк Ю. І. Моделювання контурів лісових пожеж. Пожежна безпека. 20. 2012. 170-180.
176. Смотр О. О., Грицюк Ю. І., Коваль Н. Я. Стратегічна мета та тактичні завдання пожежно-рятувальних підрозділів при ліквідації лісової пожежі. Науковий вісник НЛТУ України. 2013. Вип. 23.12. 362-373.
177. Сорока М. І. Флора судинних рослин Українського Розточчя. –Львів, 2002. 154 с.
178. Статистика міст України. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.wiki.uk-ua.nina.az>
179. Степаненко С., Білкун Д., Яник Я., Тимошук Ю. Дослідження пожеж. Довідково-методичний посібник. К.: Пожінформтехніка. 1999. 224.
180. Стойко С., Мельник А., Шушняк В. та ін. Українська частина проектного польсько-українського біосферного резервату "Розточчя" та її репрезентативне ландшафтно-екологічне значення. Біосферний резерват як модель сталого розвитку територій та об'єктів природно-заповідного фонду. Матер. міжнар. наук.-практ. конференції. Львів: Меркатор, 2003. С. 16-31.

181. Сукач Р. Ю., Ковалишин В. В., Кирилів Я. Б. Екологічна і пожежна небезпека торф'яників, торфорозробок та способи запобігання і їх ліквідації поблизу об'єктів туристично-рекреаційних комплексів. Екологічна безпека об'єктів туристично-рекреаційного комплексу: матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції. Львів: ЛДУБЖД, 2019. С. 129–130.
182. Сукач Р. Ю., Ковалишин В. В., Кирилів Я. Б., Петровський В. Л., Сорочич М. П. Дослідження тактико-технічних характеристик спеціального пожежного ствола для гасіння підземних пожеж в екосистемах торф-ліс. Пожежна безпека, №36, 2020. 108-114.
183. Сукач Р.Ю., Ковалишин В.В., Кирилів Я.Б. Тактика гасіння та протипожежне обладнання для ліквідації пожеж в екосистемах торф-ліс. *Sciences of Europe: Articles in all spheres of sciences are published in the journal. Praha, Czech Republic*, 2021. 1, 62. 44–48.
184. Товарянський В. І. Лісові пожежі. актуальність проблеми, наслідки та запобігання виникненню. Problems of Emergency Situations: Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Харків: Національний університет цивільного захисту України, 2020. 161-163.
185. Товарянський В. І., Кузик А. Д. Оцінювання залежності пожежної небезпеки соснових молодняків від віку. Науковий вісник НЛТУ України. 2016. 26 (5). 220-227.
186. Туризм і охорона культурної спадщини: український та польський досвід / В. Вакуленко, І. Валентюк, В. Грибан, С. Коротич та ін. Київ: ХНАМГ, 2003. 175 с.
187. Чисельність та щільність наявного населення, за містами та районами Івано-Франківської області. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://ifstat.gov.ua/X_OBL/OBL2.HTM
188. Шевчук В. В., Тимошук І. В. Причини виникнення лісових пожеж у соснових насадженнях Херсонщини та їхні наслідки. Лісівництво і агролісомеліорація. УкрНДІЛГА, 2017. 130. 199-207.

ДОДАТКИ

Додаток А. Фізико-хімічні показники едафічних горизонтів постпірогенних ґрунтів

№ п/п	Назва ґрунтового зразка	рН (H ₂ O)	Гумус, %	Са	Mg	NO ₃	P ₂ O ₅	K ₂ O
				мг.екв. /100 г ґрунту		мг/100 г ґрунту		
1.	Березень, 2014	7,05	1,46	0,11	0,47	0,11	21,84	72,98
2.	Березень, 2014	6,25	0,68	0,053	0,46	0,23	30,35	68,04
3.	Березень, 2014	6,37	0,36	0,21	0,56	0,19	26,46	63,95
4.	Березень, 2016	7,13	0,69	0,103	0,95	0,06	38,96	76,55
5.	Березень, 2016	7,1	0,44	0,32	0,053	0,062	36,75	70,03
6.	Березень, 2016	6,97	0,41	0,16	0,105	0,03	25,73	58,49
7.	Вересень, 2015	7,6	3,5	0,58	0,42	14,71	10,71	70,88
8.	Вересень, 2015	7,48	2,65	0,56	0,16	9,24	7,98	59,64
9.	Вересень, 2015	7,73	1,8	0,47	0,11	0,53	3,19	53,34
10.	Жовтень, 2017	7,76	5,32	0,68	0,22	21,63	54,39	1421,7
11.	Жовтень, 2017	7,77	4,63	0,42	0,53	9,19	35,49	62,53
12.	Жовтень, 2017	7,8	3,53	0,47	0,99	4,41	25,41	58,91

Аналіз зразків ґрунту проведено за загальноприйнятими в ґрунтознавстві методиками: Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв.– М.: Изд-во МГУ, 1970 – 487 с.; Практикум по агрохимии: учебное пособие. – 2 – е изд., перераб. и доп./ Под ред. академика РАСХН В.Г. Минеева. – М.: Изд-во МГУ, 2001.- 689 с. - ISBN 5-211-04265-4.

Актуальну кислотність визначено потенціометрично, нітратну форму азоту – дисульфогофеноловим методом Грандваль-Ляжу, рухомі форми фосфору і калію – за методами Мачігіна та Кірсанова, вміст гумусу – за методом Антонової, Скалабян, Сучилкіної.

Додаток Б. Показники засоленості едафічних горизонтів постпірогенних ґрунтів

Параметр	Номер проби											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Водневий показник (рН)	7,2	6,9	7,1	7,4	7,3	7,2	7,1	7,0	7,1	7,3	6,9	6,9
Сухий залишок з водної витяжки (вміст водорозч. солей), мг/кг	296	246	233	694	588	500	1517	1469	1410	1964	1336	1097
Хлориди (Cl^-), мг/кг	71,1	39,4	25,7	76,4	88,2	55,0	151,7	205,6	141,0	235,7	160,3	131,7
Сульфати (SO_4^{2-}), мг/кг	41,5	22,2	51,3	90,3	105,8	40,0	197,2	264,4	267,9	432,1	267,1	142,7
Фосфати (PO_4^{3-}), мг/кг	н.ч.м.	н.ч.м.	н.ч.м.	н.ч.м.	н.ч.м.	н.ч.м.	н.ч.м.	н.ч.м.	н.ч.м.	н.ч.м.	н.ч.м.	н.ч.м.

Висушені до повітряно-сухого стану при кімнатній температурі, розтерті у фарфоровій ступці, розсіяні на ситі. Для аналізу взято фракцію з розміром гранул менше 1,5 мм. Водна витяжка готувалась за ГОСТ 26423 – 85 – ГОСТ 26428-85 : 15-20 г проби на 200 мл дистильованої води, перемішування, відстоювання, фільтрування. Аналіз аліквоти проводився без подальшого розбавлення, перерахунок на 1000 грам (1 кг) повітряно-сухої проби.

Водневий показник (рН) – визначався потенціометрично (рН-метр рН-150И); сухий залишок – випарюванням 50 мл проби у фарфоровій чашці (КНД 211.1.4.042-95); хлориди – титруванням нітратом срібла (довідник Ю.Ю. Лурьє, 1989); сульфати – гравіметрично після осадження нітратом барію (КНД 211.1.4.026-95); фосфати – фотометрично з молібденовим реактивом (МВВ 081/12-0005-1); н.ч.м. – «нижче чутливості методу» (тобто, не виявлено стандартною методикою).

Додаток В. Протокол випробувань відібраних проб едафічних горизонтів постпірогенних ґрунтів



**ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ МЕДИЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ДАНИЛА ГАЛИЦЬКОГО
ЛАБОРАТОРІЯ ПРОМИСЛОВОЇ ТОКСИКОЛОГІЇ
Україна, 79010, м. Львів, вул. Пекарська 69, тел.: (032) 260-09-06**

Свідчення № РЛ 086/17 від 26.06.2017 р. про відповідність системи керування
вимірюваннями вимогам ДСТУ ISO 10012:2005

Дозвіл на роботу із збудинками III-IV груп патогенності (Дозвід № 38-2015 від 07.12.2015 р.)



ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідуюча лабораторією
промислової токсикології Зазуляк Т.С.
2018 р.

ПРОТОКОЛ ВИПРОБУВАНЬ № 172/3 від 23.02.2018 р.

1. **Об'єкти випробувань:** зразки ґрунтів з кодovими номерами: № 1 - № 12.
2. **Заявник:** начальник служби охорони праці ЗТС ГУ ДСНС України у Львівській області п. Андрій Гапало.
3. **Підстава:** в рамках науково-дослідної роботи "Еколого-пірологічні аспекти горіння трав'яного рослинного покриву в умовах Малого Полісся", робота виконується на базі Львівського державного університету безпеки життєдіяльності. Заява від 12.10.17 р.
4. **Мета випробувань:** визначення вмісту токсичних елементів, радіологічних та мікробіологічних показників.
5. **Термін проведення випробувань:** 20.10.2017 р. – 23.02.2018 р.
6. **Умови довкілля під час проведення випробувань:**
 - температура повітря: від 19°C до 21 °C;
 - вологість повітря: від 55% до 60 %.
7. **Засоби вимірювальної техніки та випробувальне устаткування при проведенні випробувань:**
 - ваги електронні спеціального призначення Pioneer PA 214C(свідчення про калібрування КЛІМ 774 від 26.10.2017 р.)
 - комплект діагностичний з мікроскопом лабораторним «Мікмед-6»
 - спектрофотометр атомно-абсорбційний С-115.М1, зав. № 01-2015.1, свідчення про калібрування UA/37/171129/001049 від 22.11.2017 р.
 - фотоелектроколориметр КФК-3, зав. № 9004484, свідчення про калібрування № КЛ1770 від 24.10.2017 р.

ВЛ ЛНМУ	ФОРМА Ф.Л.26.01 (версія 01)	Дата введення: 01.02.17
	Протокол випробувань	сторінка: 1/3

- спектрометр енергій бета-випромінювань СЕБ-01-150 (свідоцтво про калібрування UA 01 № 751 від 23.03.2017 р.)

- спектрометр енергій гама-випромінювань СЕГ-001 «АКП-С» (свідоцтво про калібрування UA 01 № 751 від 23.03.2017 р.)

8. Результати випробувань:

8.1 Вміст токсичних елементів

Показник, одиниці вимірювань	Виміряні величини												Метод визначення
	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8	№9	№10	№11	№12	
Свинець, мг/кг	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	ДСТУ 4770.9
Кадмій, мг/кг	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,05	0,03	0,31	0,33	0,66	0,30	0,28	0,31	ДСТУ 4770.3
Миш'як, мг/кг	0,25	0,34	0,47	0,02	0,01	0,03	0,02	0,14	0,02	0,09	0,02	0,02	*
Нікель, мг/кг	0,48	0,56	0,53	0,88	<0,02	<0,02	2,80	3,30	1,52	0,57	0,40	0,69	ДСТУ 4770.7
Кобальт, мг/кг	0,03	0,01	0,01	0,04	0,18	0,15	0,32	0,54	0,50	0,90	0,12	0,06	ДСТУ 4770.5
Марганець, мг/кг	0,15	0,23	0,13	0,54	0,17	0,54	0,76	0,56	0,45	0,95	0,48	0,91	ДСТУ 4770.1

*- «МУ по определению мышьяка в почвах фотометрическим методом», затв., 26.02.1993 р. МСГ РФ (середнє значення відносної похибки вимірювання, при довірчій ймовірності 0,95, не перевищує 18%)

8.2 Вміст радіонуклідів

Показник, одиниці вимірювань	Виміряні величини												Метод визначення
	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8	№9	№10	№11	№12	
Питома активність радіонуклідів Бк/кг (в т.ч. К 40 Ra 226 Th 232)	31,0	33,3	34,5	71,5	51,6	52,4	38,1	59,9	38,8	35,8	43,7	41,0	**
	6,34	71,8	70,3	172	168	181	180	68,3	69,6	164	187	192	
	1,45	9,77	9,6	27,3	10,4	9,852	10,1	19,6	7,56	7,68	11,1	10,8	
	1,44	13,3	14,4	22,6	20,5	0,8	9,7	26,3	1,93	10,8	12,8	1,3	

** Сцинтиляційний метод за допомогою спектрометра енергій гама-випромінювань з програмним забезпеченням обробки цифрових даних (середнє значення відносної похибки вимірювань при довірчій ймовірності 0,95 не перевищує 25%)

8.3 Мікробіологічні показники

Показник, одиниці вимірювань	Виміряні величини					
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6
БГКП, в 0,01 г	не виявлено	не виявлено	не виявлено	не виявлено	не виявлено	не виявлено
E. coli, в 0,01 г	не виявлено	не виявлено	не виявлено	не виявлено	не виявлено	не виявлено

вимірювань	Виміряні величини					
	№ 7	№ 8	№ 9	№ 10	№ 11	№ 12
БГКП, в 0,01 г	виявлено	виявлено	виявлено	не виявлено	не виявлено	не виявлено
E. coli, в 0,01 г	не виявлено	не виявлено	не виявлено	не виявлено	не виявлено	не виявлено

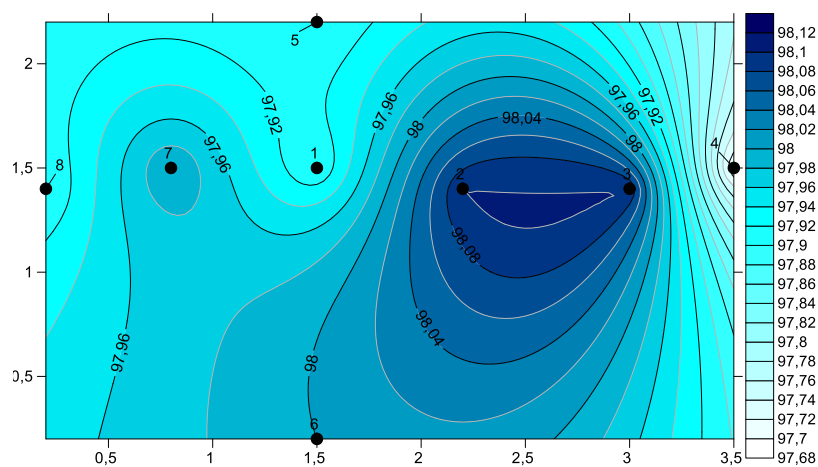
Нормативні документи на випробування: СанПіН 2.1.7.1287-03 «Санітарно-епідеміологічні вимоги до якості ґрунту».

Виконавці: Н.С.
М.Н.С.
Н.С.
Н.С.

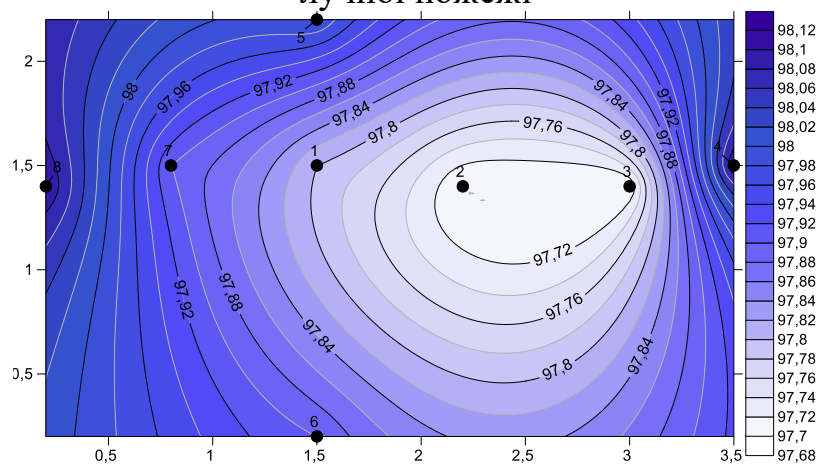
 Яськів Г. І.
 Руда І. А.
 Шевчук Л. П.
 Перейма І. В.

23 лютого 2017 р.

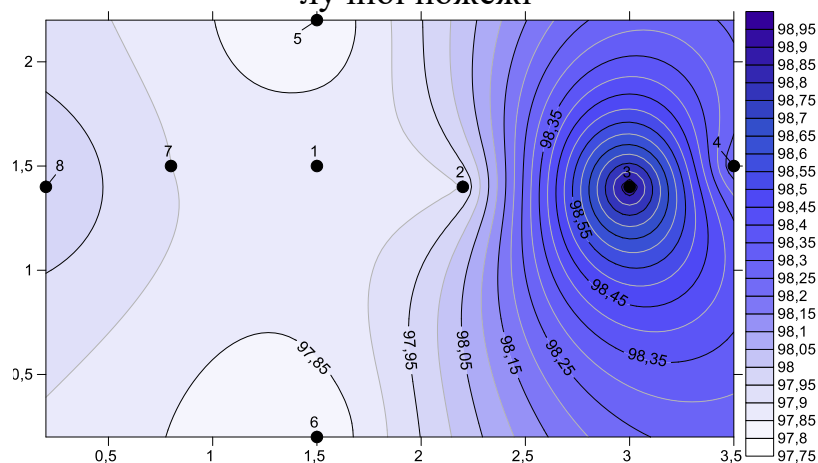
Додаток Д. 2D моделювання вологості ґрунту після проходження фронту лучної пожежі



2D моделювання вологості ґрунту на глибині 5 см після проходження фронту лучної пожежі

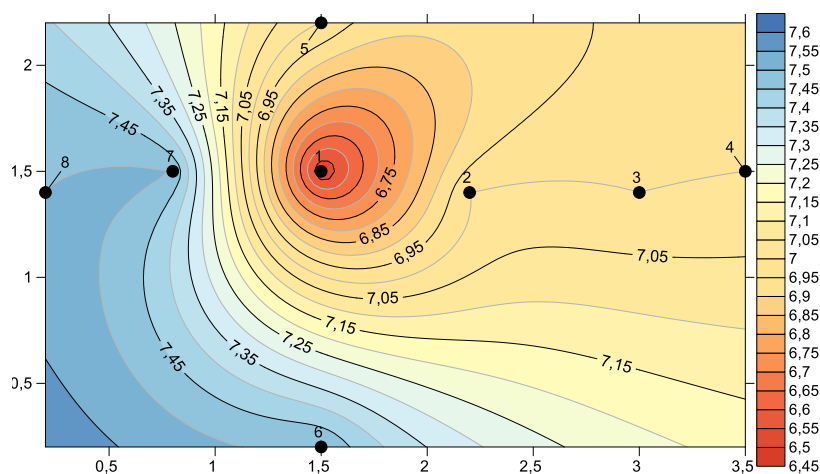


2D моделювання вологості ґрунту на глибині 10 см після проходження фронту лучної пожежі

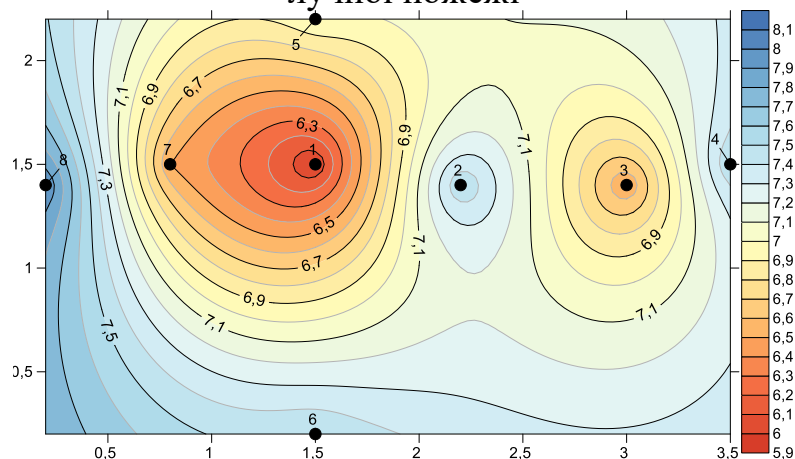


2D моделювання вологості ґрунту на глибині 20 см після проходження фронту лучної пожежі

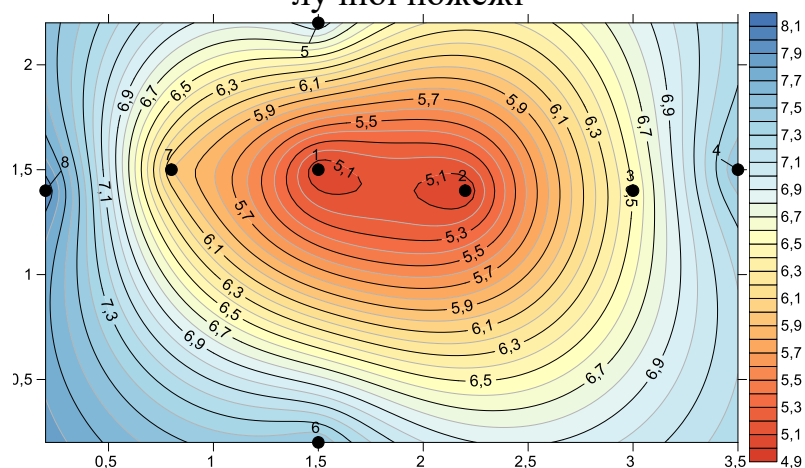
Додаток Е. 2D моделювання кислотності ґрунту після проходження фронту лучної пожежі



2D моделювання кислотності ґрунту на глибині 5 см після проходження фронту лучної пожежі

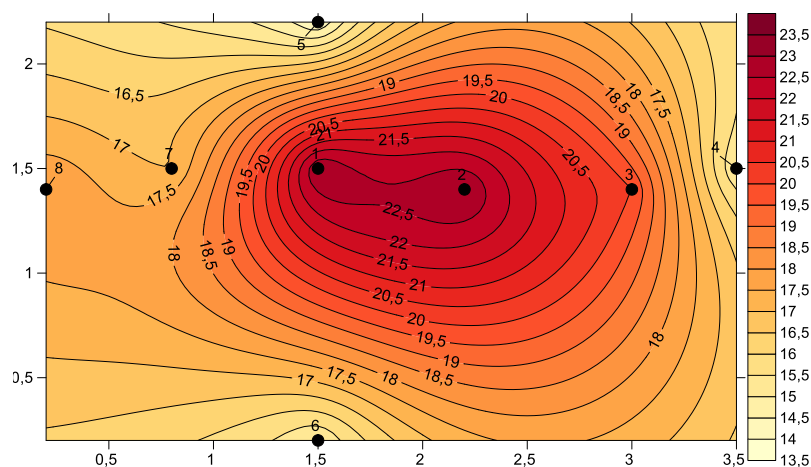


2D моделювання кислотності ґрунту на глибині 10 см після проходження фронту лучної пожежі

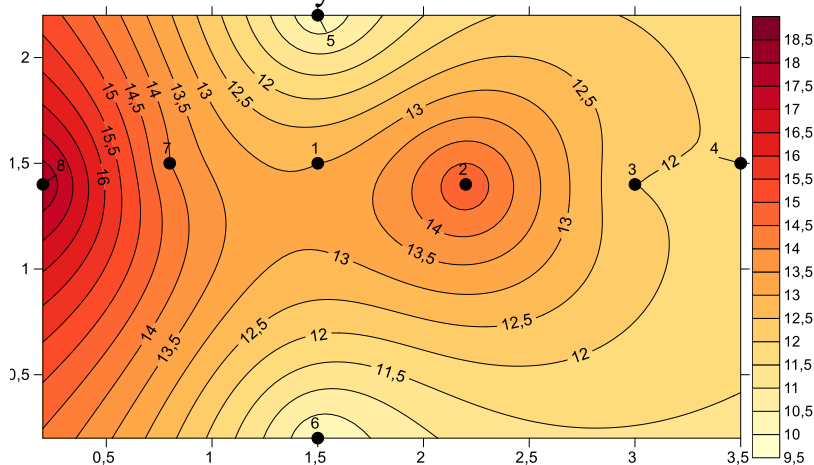


2D моделювання кислотності ґрунту на глибині 20 см після проходження фронту лучної пожежі

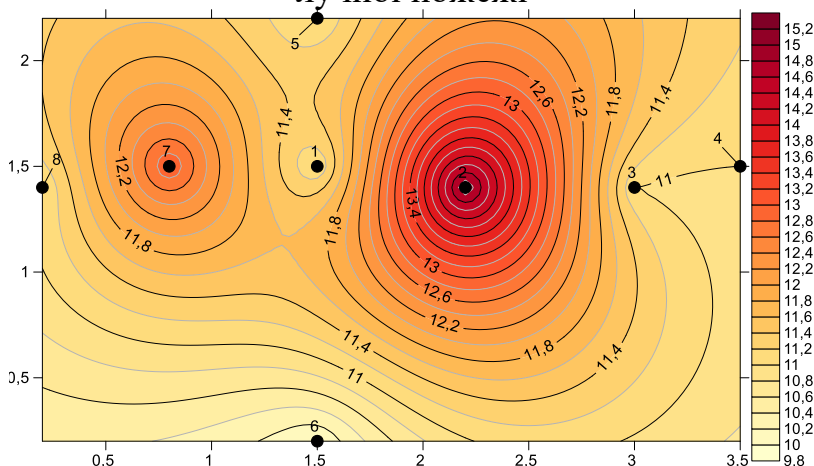
Додаток Є. 2D моделювання температури ґрунту після проходження фронту лучної пожежі



2D моделювання температури ґрунту на глибині 5 см після проходження фронту лучної пожежі



2D моделювання температури ґрунту на глибині 10 см після проходження фронту лучної пожежі



2D моделювання температури ґрунту на глибині 20 см після проходження фронту лучної пожежі

Додаток Ж. Швидкість поширення фронту лучної пожежі (м/хв) за різних значень вологості та коефіцієнтів, які враховують питому теплоємність і роздмхуючий вплив полум'я

Vf1(Vb) =

0.584
1.359
2.242
3.169
4.108
5.048
5.983
6.914
7.841
8.764
9.683
10.6
11.515
12.428
13.34

Vf2(Vb) =

0.355
0.827
1.363
1.922
2.486
3.049
3.609
4.166
4.721
5.274
5.825
6.374
6.922
7.469
8.015

Vf3(Vb) =

0.217
0.505
0.828
1.161
1.495
1.828
2.159
2.488
2.816
3.142
3.468
3.793
4.117
4.44
4.763

**Додаток 3. Протокол визначення температури займання та температури
самозаймання деревних порід**

**ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ
НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЛАБОРАТОРІЯ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ**

Свідчення про атестацію № РЛ 031/21 чинне до 27 травня 2025 р.
Ліцензія ДДПБ МНС України серія АГ № 506341 від 11.02.2011 р.

**ПРОТОКОЛ № 15/8/211007
ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ЗАЙМАЩІЯ ТА ТЕМПЕРАТУРИ
САМОЗАЙМАННЯ ТВЕРДИХ РЕЧОВИН ТА МАТЕРІАЛІВ ЗА ДСТУ
8829:2019**

Львів - 2021

ПРОТОКОЛ № 29/8/2010519

1. ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ЗАЙМАННЯ ТВЕРДИХ РЕЧОВИН ТА МАТЕРІАЛІВ ЗГІДНО З 7.8 ДСТУ 8829:2019

Дата проведення

випробування:

07.10.2021 р.

Умови в приміщенні:

температура, °C 19

атм. тиск, кПа 97.8

МІСЦЕ ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ: Теплотехнічна лабораторія науково-дослідної лабораторії ЛДУ БЖД.

Адреса: м. Львів, вул. Клепарівська, 33.

ОБ'ЄКТ ВИПРОБУВАНЬ:

Зразки лісових матеріалів (листя та деревини гілок) грабу, дуба, клену та хвої і деревини сосни на території Українського Розточчя, Жовківський р-н Львівської області

МЕТОДИКА ВИПРОБУВАНЬ: по ДСТУ 8829:2019 "Пожжевовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їх визначення. Класифікація".

7.8. Метод експериментального визначення температури займання твердих речовин і матеріалів.

Для випробування готують 10-15 зразків досліджуваної речовини (матеріалу) масою $(3,0 \pm 0,1)$ гр. Зразки матеріалів повинні мати циліндричну форму діаметром (45 ± 1) мм. Плівкові і листові матеріали набирають у стовпку діаметром (45 ± 1) мм, накладаючи шари один на одного до досягнення зазначеної маси.

Якщо при температурі випробування зразок займається, то випробування припиняють. Якщо протягом 20 хв зразок не займається, або раніше цього часу цілком припиниться димовиділення, то випробування припиняють і в протоколі відзначають відмовлення.

За температуру займання приймають покази термоелектричного перетворювача, що вимірює температуру зразка. Методом послідовних наближень визначають мінімальну температуру зразка, при якій за час витримки в поці не більше 20 хв зразок займається і буде горіти більше 5 с після віддалення палика, а при температурі на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ менше займання відсутнє.

За температуру займання досліджуваної речовини (матеріалу) приймають середнє арифметичне двох температур, що відрізняються не більше ніж на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, при одній з яких спостерігається займання 3 зразків, а при іншій – три відмовлення. Отримане значення температури округляють з точністю до $5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

ХАРАКТЕРИСТИКА ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ:

Таблиця 1

№ п/п	Найменування приладу чи пристрою	Заводський номер	Гамма вимірювання	Клас точності або похибка вимірювання
1	Устатковка ОПІ	0614	Від 20 до 600 °С	-
2	Регулятор вимірювач РТ 0102	10.354	Від 0 до 1200 °С	+ 2 °С
3	Термопара ТХА	6	Від 0 до 1200 °С	-
4	Секундомір СОП	8625	Від 0 до 3600 с	Клас точн. 2
5	Ваги ВТУ 210/ СЗ	1826	Від 0 до 210 г	Клас точн. 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДАНІ:

Таблиця 2. Показники температури займання листя та деревини гілок ГРАБУ

№ зразка	Температура випробування, °С	Результат випробування
1	315	відмова
2	315	відмова
3	315	відмова
4	325	займання
5	325	займання
6	325	займання

ВИСНОВОК: Згідно з 7.8 ДСТУ 8829:2019 температура займання вірця листя та деревини грабу складає 320°С.

Таблиця 3. Показники температури займання листя та деревини гілок ДУБУ

№ зразка	Температура випробування, °С	Результат випробування
1	310	відмова
2	310	відмова
3	310	відмова
4	320	займання
5	320	займання
6	320	займання

ВИСНОВОК: Згідно з 7.8 ДСТУ 8829:2019 температура займання вірця листя та деревини дубу складає 315°С.

Таблиця 4. Показники температури займання листя та деревини гілок КЛЕНУ

№ зразка	Температура випробування, °C	Результат випробування
1	295	відмова
2	295	відмова
3	295	відмова
4	305	займання
5	305	займання
6	305	займання

ВИСНОВОК: Згідно з 7.8 ДСТУ 8829:2019 температура займання взірця листя та деревини клену складає 300°C.

Таблиця 5. Показники температури займання хвої та деревини гілок СОСНИ

№ зразка	Температура випробування, °C	Результат випробування
1	300	відмова
2	300	відмова
3	300	відмова
4	310	займання
5	310	займання
6	310	займання

ВИСНОВОК: Згідно з 7.8 ДСТУ 8829:2019 температура займання взірця хвої та деревини сосни складає 305°C.

2. ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ САМОЗАЙМАННЯ ТВЕРДИХ РЕЧОВИН ТА МАТЕРІАЛІВ ЗГІДНО З 7.10 ДСТУ 8829:2019

Дата проведення
випробування: 08.10.2021 р.

Умови в приміщенні:
температура, °C 19
атм. тиск, kPa 97,6

МІСЦЕ ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ: Теплотехнічна лабораторія науково-дослідної лабораторії ІДНУ БЖД.
Адреса: м. Львів, вул. Клепарівська, 35.

МЕТОДИКА ВИПРОБУВАНЬ: по ДСТУ 8829:2019 "Пожжевовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їх визначення. Класифікація".

7.10. Метод експериментального визначення температури самозаймання твердих речовин і матеріалів.

Метод реалізується в діапазоні температур від 25 °С до 600 °С :

Для випробування готують 10-15 зразків досліджуваної речовини (матеріалу) масою $(3,0 \pm 0,1)$ гр. Зразки матеріалів повинні мати циліндричну форму діаметром (45 ± 1) мм. Штуківі і листові матеріали набирають у стопку діаметром (45 ± 1) мм, накладаючи шари один на одного до досягнення зазначеної маси.

Методом послідовних наближень визначають мінімальну температуру робочої камери, при якій зрієць самозаймається і горить більше 5 с, а при температурі на 10 °С менше – спостерігається відмова.

За температуру самозаймання досліджуваної речовини (матеріалу) приймають середнє арифметичне двох температур, що відрізняються не більше ніж на 10 °С, при одній з яких спостерігається самозаймання з тривалістю 3 тривалі, а при іншій – три відмови. Отримане значення температури самозаймання округлюють з точністю до 5 °С.

ХАРАКТЕРИСТИКА ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ:

Таблиця 6.

№ ш/п	Найменування приладу чи пристрою	Заводський номер	Границя вимірювання	Клас точності або похибка вимірювання
1	Установка ОТП	б/н	Від 25 до 600 °С	-
2	Секундомір СОП	8625	Від 0 до 3600 с	Клас точн. 2
3	Термоміра ТХА	6	Від 0 до 1200 °С	2 °С
4	Регулятор-вимірювач РТ-0102	10,354	Від 0 до 1200 °С	
5	Ваги ВТУ 210/СЗ	1826	Від 0 до 210 г	Клас точн. 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДАНІ:

Таблиця 7. Показники температури займання листя та деревини гілок ГРАБУ

№ зразка	Температура випробування, °С	Результат випробування
1	470	відмова
2	470	відмова
3	470	відмова
4	480	самозаймання
5	480	самозаймання
6	480	самозаймання

ВИСНОВОК: Згідно з 7.10 ДСТУ 8829:2019 температура самозаймання вірця листя та деревини гілок грабу складає 475 °С.

Таблиця 8. Показники температури займання листя та деревини гілок ДУБУ

№ зразка	Температура випробування, °С	Результат випробування
1	480	відмова
2	480	відмова
3	480	відмова
4	490	самозаймання

5	490	самозаймання
6	490	самозаймання

ВИСНОВОК: Згідно з 7.10 ДСТУ 8829:2019 температура самозаймання зрізів листя та деревини гілок дубу складає 485 °С.

Таблиця 9. Показники температури займання листя та деревини гілок КЛЕНУ

№ зразка	Температура випробування, °С	Результат випробування
1	490	відмова
2	490	відмова
3	490	відмова
4	500	самозаймання
5	500	самозаймання
6	500	самозаймання

ВИСНОВОК: Згідно з 7.10 ДСТУ 8829:2019 температура самозаймання зрізів листя та деревини гілок клену складає 495 °С.

Таблиця 10. Показники температури займання хвої та деревини гілок СОСНИ

№ зразка	Температура випробування, °С	Результат випробування
1	495	відмова
2	495	відмова
3	495	відмова
4	505	самозаймання
5	505	самозаймання
6	505	самозаймання

ВИСНОВОК: Згідно з 7.10 ДСТУ 8829:2019 температура самозаймання зрізів хвої та деревини гілок грабу складає 500 °С.

Начальник
НДЛ ЛДУБЖД

Науковий співробітник, к.т.н.
НДЛ ЛДУБЖД

Викладач кафедри екологічної
безпеки, к.т.н., майор служби н.с.

Ад'юнкт кафедри
екологічної безпеки ЛДУБЖД



Віталій ПЕТРОВСЬКИЙ

Павло ПАСТУХОВ

Павло БОСАК

Андрій ГАЦАЛО

Додаток І. Список публікацій здобувача

Публікації, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. Попович В. В., Гапало А. І. Температурний вплив ландшафтних пожеж на екологічний стан едафотопу. *Zeszyty Naukowe SGSP*, 2020, Nr. 76/4/2020. 29-45. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.5977> (індексується в *Index Copernicus International*).
2. Попович В. В., Гапало А. І. Засоленість постпірогенних ґрунтів Українського Розточчя. *Вісник ЛДУБЖД*, №22, 2020. 12-17. <https://doi.org/10.32447/20784643.22.2020.02>
3. Попович В. В., Гапало А. І., Башинський О. І. Обвуглювання стовбурів листяних дерев під час лісових пожеж в межах Українського Розточчя. *Пожежна безпека*, №37, 2020. 58-63. <https://doi.org/10.32447/20786662.37.2020.09>
4. Popovych, V., Gapalo, A. Monitoring of Ground Forest Fire Impact on Heavy Metals Content in Edafic Horizons. *Journal of Ecological Engineering*, 22(5), 2021. 96-103. <https://doi.org/10.12911/22998993/135872> (індексується в *Scopus*).
5. Popovych, V., Henyk, Y., Gapalo, A., Bosak, P., Popovych, N. Specific Activity of Radionuclides in Soils Disturbed by Forest Fires. *Journal of Ecological Engineering*, 23(6), 2022. 265–270. <https://doi.org/10.12911/22998993/148191> (індексується в *Scopus*).
6. Popovych, V., Gapalo, A., Tovarianskyi, V. Investigation of Fires in Natural Ecosystems of the Ukrainian Roztochchiya by Wildland Fire Dynamics Simulator Model. *Ecological Engineering and Environmental Technology*, 24(3), 2023. 36-42. <https://doi.org/10.12912/27197050/159576> (індексується в *Scopus*).

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

1. Гапало А. І. Еколого-пірологічна небезпека спалювання лучної рослинності. *Проблеми екологічної безпеки: Матер. XV Міжнар. наук.-техн. конф. (м. Кременчук, 11-13 жовтня 2017 р.)*. 2017. С. 22. Форма участі очна.

2. Гапало А. І. Особливості виникнення та поширення низових лісових пожеж на території Львівської області. *Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи: Матер. III Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Львів, 14 вересня 2018 р.).* 2018. С. 25. Форма участі очна.
3. Гапало А. І. Особливості виникнення ландшафтних пожеж у Львівській області. *Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності: Зб. наук. праць XIII Міжнар. наук.-практ. конф. молодих вчених, курсантів та студентів (м. Львів, 22-23 березня 2018 р.).* 2018. С. 153-154. Форма участі очна.
4. Попович В. В., Гапало А. І. Вплив лісових пожеж на фізико-хімічні показники ґрунту. *Сучасний стан і перспективи розвитку ландшафтної архітектури, садово-паркового господарства, урбоекології та фітомеліорації: Матер. Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Львів, 4-5 квітня 2019 р.).* 2019. С. 289-290. Форма участі очна.
5. Gapalo A., Popovych V. Environmental hazard of burning dry grass and grassland vegetation. *Ecological impact of fire. Deforestation and forest degradation. Reclamation of devastated landscapes: The second round table (Lviv, March 29, 2019).* 2019. P. 7-9. Форма участі очна.
6. Popovych, V., Gapalo, A., Shukel, I., Renkas, A. Logistic chains of application of firefighting equipment for suppression of forest and natural ecosystems fires. *SGEM 2020: 20th International Scientific GeoConference (Albena, 18 – 24 August, 2020).* 2020. 20(5.1). P. 499-506. <https://doi.org/10.5593/sgem2020/5.1/s20.063> (індексується в Scopus). Форма участі дистанційна.
7. Гапало А. І., Попович В. В. Особливості розвитку та ліквідації лісових пожеж. *Актуальні питання техногенної та цивільної безпеки України: Матер. II Всеукр. наук. конф. (м. Миколаїв, 18-19 вересня 2020 р.).* 2020. С. 135-136. Форма участі дистанційна.
8. Попович В. В., Гапало А. І. Важкі метали в поверхневому шарі едафотопу на постпірогенних територіях. *Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи: Матер. IV Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Львів, 26 березня 2021 р.).* 2021. С. 133-134. Форма участі очна.

Додаток К. Акт впровадження результатів в навчальний процес

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з навчальної та методичної роботи
Львівського державного університету безпеки
життєдіяльності,
кандидат технічних наук, доцент,
полковник служби цивільного захисту
Дмитро ЧАЛИЙ
2023 року

АКТ

про впровадження результатів дисертаційного дослідження Андрія ГАПАЛА у навчальний
процес Львівського державного університету безпеки життєдіяльності

Комісія у складі:

голови комісії: заступника начальника навчально-наукового інституту цивільного захисту, к.ф.-м.н., доцента, полковник а служби цивільного захисту Ольги МЕНЬШИКОВОЇ; членів комісії: завідувача кафедри екологічної безпеки д.с.-г.н., професора Андрія КУЗИКА та старшого викладача кафедри екологічної безпеки к.т.н., майора служби цивільного захисту Павла БОСАКА встановила, що результати дисертаційного дослідження Андрія ГАПАЛА на тему: «Вплив небезпечних чинників лучних пожеж на довкілля» впроваджені під час викладання дисципліни в Університеті на кафедрі екологічної безпеки:

– змістового модулю № 1. “Теоретичні передумови виникнення пожеж у природних екологічних системах” тема № 1.4: “Наслідки пожеж у природних екосистемах” з дисципліни “Пожежі в природних екосистемах” за спеціальністю 101 “Екологія”;

– змістового модулю № 2. “Методи та способи гасіння пожеж у природних екосистемах та оцінювання екологічних наслідків” тема № 2.5: “Еколого-техногенна небезпека горіння відвалів вуглеводобування і сміттєзвалищ” з дисципліни “ Пожежі в природних екосистемах ” за спеціальністю 101 “Екологія”.

Результати дисертаційного дослідження використані в лекційних курсах зазначеної навчальної дисципліни при викладенні теоретичних положень та методичних підходів щодо проведення досліджень небезпечних чинників (ступеня обвуглювання стовбурів дерев основних лісоутворюючих порід під час лісових пожеж, вплив низових лісових пожеж на концентрацію рухомих форм важких металів у різних горизонтах ґрунту та ін.) на стан довкілля.

Голова комісії:

Заступник начальника
навчально-наукового інституту
цивільного захисту,
к. ф.-м. н., доцент,
полковник служби цивільного захисту

 Ольга МЕНЬШИКОВА

Члени комісії:

Завідувач кафедри
екологічної безпеки,
д. с.-г. н., професор

 Андрій КУЗИК

Старший викладач кафедри
екологічної безпеки,
к. т. н.,
майор служби цивільного захисту

 Павло БОСАК

Додаток Л. Акт впровадження в практичну діяльність підрозділів ДСНС України

ЗАТВЕРДЖУЮ
В.о. начальника АРЗ СП ГУ ДСНС
України у Львівській області

Андрій РАТУШНИЙ

АКТ

впровадження результатів дисертаційних досліджень ГАПАЛА Андрія
Ігоровича на тематику запобігання поширення лучних пожеж

Комісія у складі: голови комісії – начальника пожежно-рятувальної частини АРЗ СП УЛИЧНОГО Романа Руслановича; членів комісії – заступника начальника аварійно-рятувальної частини АРЗ СП ГЛАДУНА Івана Романовича, заступника начальника пожежно-рятувальної частини АРЗ СП МУХИ Святослава-Андрія Ігоровича склала цей акт та стверджує, що результати дисертаційних досліджень та інженерно-технічні рішення ГАПАЛА Андрія Ігоровича впроваджені у практичну діяльність АРЗ СП ГУ ДСНС України у Львівській області, зокрема, геометричні параметри протипожежних бар'єрів для локалізації лучних пожеж; значення відстані від фронту лучної пожежі до місця їх створення; дальність розлітання іскор та продуктів піролізу від осередку горіння лучної рослинності; кількість особового складу пожежно-рятувального підрозділу для гасіння іскор, які розлітаються від лучної пожежі; час рятування людей – враховуються підрозділом АРЗ СП ГУ ДСНС України у Львівській області під час ліквідації лучних та пожеж в природних екосистемах.

Голова комісії:



Роман УЛИЧНИЙ

Член комісії:



Іван ГЛАДУН

Член комісії:

Святослав-Андрій МУХА