



Наукові праці Лісівничої академії наук України
Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine

<http://fasu.nltu.edu.ua>
<https://doi.org/10.15421/412415>

Article received 2024.05.19
Article accepted 2024.10.18

ISSN 1991-606X print

ISSN 2616-5015 online

@ ✉ Correspondence author

Volodymyr Voron

52corvus@gmail.com

86 Hryhoriy Skovoroda st., Kharkiv, 61024, Ukraine

УДК 630*43:630.561.243

Лісотипологічне оцінювання природної пожежної небезпеки лісів

В. П. Ворон¹, А. Д. Кузик², С. В. Івашинюта³, Ю. Р. Ціпан⁴

Проаналізовано масштабність та наслідки лісових пожеж в Україні за останні роки. Для попередження виникнення лісових пожеж вагоме значення має пошук нових підходів щодо оцінювання пожежної небезпеки, які мають враховувати не лише фізичні принципи виникнення й поширення пожеж, але й базуватися на лісівничих засадах. Об'єктами досліджень були типи лісів України та їхня стійкість до ураження лісовими пожежами. Природну пожежну небезпеку соснових лісів оцінювали, базуючись на списку типів лісу за Б. Ф. Остапенком, В. П. Ткачем (2002). Враховано особливості видового складу рослинності в межах типів лісу, що сформувались у рівнинних умовах України, вплив лісорослинних умов та лісової рослинності, як горючого матеріалу, на пожежну небезпеку. Встановлено залежність природної пожежної небезпеки від лісотипологічних особливостей насаджень, що зумовлено формуванням породного складу, запасу підстилки та рясності живого надґрунтового вкриття.

За результатами експериментальних досліджень щодо займання трав'яних рослин і мохів у межах Мало́го Полісся, до пожежонебезпечних видів віднесено 14 трав'яних рослин з родини Тонконогових, 11 – з родини Осокових, 4 – з родини Брусничних, п'ять видів мохів та лишайників. Найбільше представництво пожежонебезпечних видів рослин спостережено у сухому борі (А₁). Встановлено, що деякі види рослин (гігрофіти та мезогігрофіти) здатні швидко загорятись і підтримувати горіння. Здійснено поділ типів лісу на п'ять класів пожежної небезпеки: до першого класу віднесено дуже сухі і сухі типи лісорослинних умов; до другого, третього і четвертого класів – відповідно, свіжі, вологі та сирі типи, а до п'ятого класу – типи лісу мокрих і дуже мокрих лісорослинних умов. Удосконалено шкалу оцінювання природної пожежної небезпеки ділянок лісового фонду, як об'єктів загоряння, з урахуванням типів лісу.

Ключові слова: лісові пожежі; гігропон; трофотон; горючі матеріали; підстилка; живе надґрунтове вкриття; захаращеність; лісова рослинність.

Вступ (Introduction). Проблема лісових пожеж останніми роками набула небачених масштабів. Починаючи з 2017 р., відзначено безпрецедентне збільшення площі та кількості випадків лісових пожеж у всьому світі: в Португалії і Чилі (Gómez-

González, Ojeda, & Fernandes, 2018), Індонезії (Rochmyaningsih, 2020), Португалії (Boer et al., 2017), Сибіру (McCarty, Smith, & Turetsky, 2020; Nolan et al., 2020a), Австралії (Nolan et al., 2020), у басейнах річок Амазонки та Оріноко (Barlow et al.,

¹ Ворон Володимир Пантелеймонович – академік Лісівничої академії наук України, доктор сільськогосподарських наук, головний науковий співробітник. Український науково-дослідний інститут лісового господарства та агролісомеліорації ім. Г. М. Висоцького, м. Харків, 61024, Україна. E-mail: 52corvus@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1059-3032>

² Кузик Андрій Данилович – доктор сільськогосподарських наук, професор, проректор з наукової роботи. Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, 79057, Україна. E-mail: andrij_k@yahoo.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0118-9493>

³ Івашинюта Сергій Володимирович – кандидат сільськогосподарських наук. Надслучанський інститут Національного університету водного господарства та природокористування, м. Березне, 34600, Україна. E-mail: s.v.ivashyniuta@nuwm.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7397-2014>

⁴ Ціпан Юлія Романівна – старший викладач. Надслучанський інститут Національного університету водного господарства та природокористування, м. Березне, 34600, Україна. E-mail: y.r.tsipan@nuwm.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7279-7416>

2020), у західній частині США (Pickrell, & Pennisi, 2020). За даними супутникових знімків, з 2000 р. вогнем щороку було охоплено 350 млн га вкритої рослинністю території земної поверхні, більшість якої – це ліси (Кузик, 2019). За результатами досліджень Ma et al. (2020) представлено широкий аналіз особливостей лісових пожеж у Китаї.

Постійно напружена ситуація з лісовими пожежами і в Україні (Кузик, 2019; Ворон та ін., 2021). Загалом за період 1992-2017 рр. у лісах, підпорядкованих Державному агентству лісових ресурсів України, зафіксовано 86958 пожеж, а загальна площа лісів, пошкоджених пожежами, становила 115457 га. Класичним прикладом є катастрофічні лісові пожежі в Українському Поліссі та Луганщині у 2020 р., коли вплив комплексу несприятливих чинників призвів до найбільших лісових пожеж за всю історію незалежної України. Пожежами було охоплено понад 74,6 тис. га лісів, а економічні втрати сягнули 19,1 млрд грн (Зібцев та ін., 2023).

Пожежна безпека – це комплексне оцінювання чинників середовища, що впливають на виникнення і поширення лісових пожеж (Ходаков, Жарікова, 2011). При цьому у наукових публікаціях пожежна безпека часто трактується як синонім пожежних ризиків, хоча їх варто розглядати як окремі складові (Bachmann, & Allgower, 2000). На сьогодні виділяють: а) природну пожежну небезпеку ділянок лісового фонду, що враховує переважно статичні змінні, які не змінюються або змінюються повільно (стрімкість схилу, експозиція, тип рослинності, тип ґрунту тощо); б) пожежну небезпеку за умовами погоди, що враховує переважно динамічні погодні чинники.

В Україні для визначення природної пожежної небезпеки ділянок лісового фонду використовують шкалу (Правила пожежної безпеки..., 2004), яка базується на лісівничій характеристиці ділянок лісового фонду (склад, вік, наявність підросту та підліску). Поряд з тим, ця шкала є калькою запропонованої у свій час шкали І.С. Мелехова. Вона загалом відображає лише напрямки поділу земельних ділянок лісового фонду на класи пожежної небезпеки без урахування різноманіття типів лісу, оперуючи лише типами лісорослинних умов, особливостями періодів пожежонебезпечного сезону, переважаючими видами лісових горючих матеріалів. Розглянуті лише хвойні та листяні породи загалом, а конкретизація деревних видів відсутня. Тому *високою актуальністю* відзначається питання уточнення та подальшого удосконалення шкали природної пожежної небезпеки.

Мета роботи – оцінити природну пожежну небезпеку лісів у рівнинній частині України на лісо-типологічній основі для оптимального планування заходів щодо захисту лісу від пожеж.

Об'єкти та методика дослідження (Objects and methods). *Об'єкт дослідження* – соснові насадження у різних типах лісу рівнинної частини України. *Предмет дослідження* – природна по-

жежна небезпека лісостанів, горимість лісів, лісові горючі матеріали та прогнозування пожежної небезпеки.

Для досягнення мети визначено такі основні *завдання дослідження*: оцінювання природної пожежної небезпеки соснових лісів України; встановлення видового складу трав і мохів, які, завдяки здатності швидко загорятися, посилюють загрозу виникнення пожеж; розподілення типів лісу соснових лісів рівнинної частини України на п'ять класів пожежної небезпеки; удосконалення шкали оцінювання природної пожежної небезпеки ділянок лісового фонду, як об'єктів загоряння, з урахуванням типів лісу.

Для оцінювання природної пожежної небезпеки ділянок лісового фонду (соснових лісів) використано відношення рослинності до пожеж у межах типів лісу. Для цього використано відповідні напрацювання (Кузик, 2019; Левченко, Борсук О., Борсук А., 2015) та результати досліджень лабораторії екології лісу УкрНДЛГА (Ворон та ін., 2021).

Відповідно до складу надґрунтового вкриття та його відношення до вологості ґрунту, оцінено природну пожежну небезпеку соснових лісів згідно зі списком типів лісу, сформованого Б.Ф. Остапенком, В.П. Ткачем (2002).

Враховано екологічні особливості типів лісу, що виділені у рівнинній частині України, з поділом їх на п'ять класів пожежної небезпеки. До першого класу пожежної небезпеки віднесено дуже сухі і сухі типи лісу, до другого, третього і четвертого класів – відповідно свіжі, вологі та сирі, до п'ятого класу – типи лісу у мокрих та дуже мокрих лісорослинних умовах.

Результати (Results). Дослідження лісових пожеж у різних регіонах України дало змогу встановити тенденції їх виникнення та особливості постпірогенного пошкодження лісів (Ворон та ін., 2021): 1) переважна більшість пожеж виникає в найбільш пожежонебезпечних сосняках; 2) підстилка, яка є однією із основних складових лісового горючого матеріалу (ЛГМ), відіграє вирішальну роль у виникненні та розвитку пожеж; 3) постпірогенний розвиток сосняків визначається інтенсивністю пошкодження, таксаційними показниками деревостанів і типом лісорослинних умов; пірогенні наслідки для сосняків у вологих і сирих гігротопах більш катастрофічні, ніж у сухих та свіжих умовах; 4) у сприятливі роки за кількістю опадів, під час низових пожеж домінують пошкодження стовбура; катастрофічними є наслідки пожеж в аномально сухі роки, коли відбувається пошкодження крони конвективними потоками гарячого повітря; у вологих і сирих гігротопах до загибелі сосняків призводить пошкодження кореневих систем; 5) летальним для розвитку сосняків є пошкодження: конвективними потоками 2/3 крони дерев; тепловипромінюванням – стовбура за товщини кори менше ніж 3 мм; теплопровідністю – поверхневої кореневої системи й корневих лап.

Наявність смолистих речовин у сосни, ефірних масел у кедра, ялиці, ялини підвищує їхню горимість. Запас пожежонебезпечних речовин – живиці та скипидару в її складі зростає у деревостанах зі збільшенням частки сосни та віку і зменшується зі зниженням повноти (Кузик, 2019).

Найбільш пожежонебезпечними є сосняки і модринаки, які пропускають багато сонячного проміння, що призводить до швидкого висихання опадів і лісової підстилки (Левченко та ін., 2015). Молодняки і середньовікові деревостани є більш пожежонебезпечними, ніж стиглі. Сосняки надзвичайно легко піддаються загорянню у дуже сухих та сухих борах (A_0 , A_1); легко піддаються у свіжих борах (A_2), суборах (B_2) і сугрудах (C_2). Відносно помірну небезпеку загоряння спостережено у вологих борах (A_3) і суборах (B_3). Важко піддаються загорянню сосняки в сирих і мокрих борах та суборах (A_4 , B_4 , A_5 , B_5), вологих (C_3), сирих (C_4) і мокрих (C_5) сугрудах (Кузик, 2019; Левченко та ін., 2015). Тобто небезпека виникнення пожежі у лісі зменшується зі збільшенням вологості лісорослинних умов і багатства ґрунту.

У наземній групі лісових горючих матеріалів переважають живе надґрунтове вкриття, опад і лісова підстилка. Інтенсивність пожежі залежить, насамперед, від запасу горючого матеріалу, основною складовою якого є лісова підстилка. Особливо важлива ця умова для сосняків Полісся, в яких запас підстилки змінюється від 124 до 830 ц/га, збільшуючись з віком (Ворон та ін., 2021). Найменший він у віці 20-30 років (124-246 ц/га), а максимального значення набуває у 80-річних сосняках (830 ц/га).

У сосняках, подібних за гігروتопом, у дещо багатших трофотопних (суборах) нагромаджуються більші запаси підстилки, ніж у бідних умовах (борах). Так, у 60-річних сосняках у борових умовах запас підстилки становив 355, а в суборових – 703 ц/га. В умовах сугрудку запас мортмаси є меншим, що свідчить про інтенсивний процес розкладання підстилки.

Під час встановлення потенційної пожежної небезпеки виникає певне протиріччя у зв'язку з тим, що небезпека виникнення пожежі є найменшою у вологих гігروتопних, проте загальний запас наземних горючих матеріалів є найбільшим саме у типах лісорослинних умов з надмірним зволоженням ґрунту, де розкладання органічної речовини відбувається повільно.

Водночас за посушливих погодних умов унаслідок висихання величезних запасів мортмаси сосняки навіть у вологих типах лісу стають пожежонебезпечними, а температура горіння підстилки може перевищувати 600°C, що створює надзвичайну пожежну загрозу. Про це свідчать пожежі в аномально сухому 2015 р. на території Полісся, коли горіння соснових лісостанів саме у вологих суборах призвело до катастрофічних наслідків (Ворон та ін., 2021).

У таких умовах важливим чинником пожежної небезпеки є також формування, поряд із опадом хвої, гілок, шишок, живого надґрунтового вкриття (ЖНВ). Його біомаса у сухих гігروتопних є незначною, оскільки тут ЖНВ формується переважно лишайниками та злаками. Водночас у вологих борах надґрунтове вкриття формується за рахунок мохів, а у вологих суборах – мохів, чорниці та брусниці, біомаса яких може сягати 114 ц/га.

У виникненні пожеж вагоме значення має видовий склад і яскравість трав'яного вкриття. Так, менш пожежонебезпечними є сосняки зеленомохові і чорничникові, ніж з покривом із вересу, брусниці, лишайників, а в сосняках-довгомошниках і сфагнових пожежа можлива тільки після тривалої посухи (Левченко та ін., 2015). У лісах виникнення і поширення низових пожеж залежать від видового складу, яскравості та проективного трав'яного вкриття.

Трав'яні рослини, мохи та лишайники поділяють на пожежонебезпечні, слабозаймисті та вогнестійкі (Кузик, 2019). Займистими вважають рослини з вічнозеленим листям або голками; малими або мереживними жорсткими листками; великим вмістом летких олій, терпенів, ароматизаторів; трави у сухому стані, які горять, а не тліють, під час контакту з полум'ям сірника.

Займисті рослини мають тонкі тверді листки (ксерофіти) і представлені переважно різноманітними злаками. Важче займаються та повільно горять рослини з широкими м'ясистими листками, з високим вмістом солей у тканинах.

За результатами експериментальних досліджень (Кузик, 2019) встановлено швидкість займання трав'яних і мохових рослин у межах Малого Полісся. До пожежонебезпечних видів віднесено 14 видів трав'яних рослин із родини Тонконогових (грязиця збірна [*Dactylis glomerata* L.], кипець сизий [*Koeleria glauca* (Spreng.) DC.], ковила периста [*Stipa johannis* Cel.], костриця овеча [*Festuca ovina* L.], куничник наземний [*Calamagrostis epigeios* (L.) Roth.], куцоніжка периста [*Brachypodium pinnatum* P.B.], молінія голуба [*Molinia caerulea* (L.) Moench], гвоздика піскова [*Dianthus arenarius* L.], перлівка поникла [*Melica nutans* L.], просянка розлога [*Milium effusum* L.], тимофіївка степова [*Phleum phleoides* Sm.], тонконіг сизий [*Koeleria glauca* (Spreng.) DC.], тонконіг гайовий [*Poa nemoralis* L.], щучник дернистий [*Deschampsia cespitosa* L.]); 11 видів трав'яних рослин із родини осокових (осока багнова [*Carex limosa* L.], осока вздута [*Carex inflata* Huds.], осока волосиста [*Carex pilosa* Scop.], осока загострена [*Carex acutiformis* Ehrh.], осока короткошиїкова [*Carex brevifolia* D.C.], осока лісова [*Carex sylvatica* Huds.], осока несправжньосмикавцева [*Carex pseudocyperus* L.], осока пухирчата [*Carex vesicaria* L.], осока пухнатопада [*Carex lasiocarpa* Ehrh.], осока чорноколоса [*Carex melanostachya* M.B.], пухівка піхвова [*Eriophorum vaginatum* L.]); чотири види

трав'яних рослин з родини брусничних (брусниця [*Vaccinium vitis-idaea* L.], буяхи [*Vaccinium uliginosum* L.], журавлина болотяна [*Vaccinium oxycoccos* L.], чорниця [*Vaccinium myrtillus* L.]); п'ять видів мохів (гілокомій блискучий [*Hylocomium splendens* (Hedw.) Schimp.], дикран хвилястий [*Dicranum undulatum* Ehrh.], плевроцій Шребера [*Pleurozium schreberi* (Willd. Ex Brid.) Mitt.], птілій пірчатий [*Ptilium crista-casterensis* (Hedw.) De Not.], цетрарія ісландська [*Cetraria islandica* L. Ach.]), а також лишайники роду Кладонія (*Cladonia* Nyl.) та верес звичайний (*Calluna vulgaris* [L.] Hull).

Найбільше представництво пожежонебезпечних видів встановлено у сухому бору (А₁), де із 11 видів вісім мають високу здатність до загорання (табл. 1). Вони належать переважно до родини Злакових або Тонконогових. Із збільшенням вологості і трофності, кількість видів слабозаймистих і вогнестійких рослин збільшується, а пожежонебезпечних – зменшується. Пожежонебезпечні види відмічено також у мокрих і сирих гігротопах.

Таблиця 1. Кількість видів трав'яних рослин, мохів і лишайників за пожежною небезпекою у різних типах лісорослинних умов

Table 1. Number of herbaceous plants, mosses and lichens species according to the fire hazard in different types of forest site conditions

Індекс ТЛУ	Категорії пожежної небезпеки			Всього
	Пожежо- небезпечні	Слабо- займисті	Вогне- стійкі	
A ₁	8	1	2	11
A ₂	2	1	3	6
A ₃	2	–	1	3
A ₄	6	–	3	9
A ₅	3	–	2	5
B ₁	5	5	6	16
B ₂	2	6	6	14
B ₃	7	–	4	11
B ₄	9	–	4	13
B ₅	5	3	6	14
C ₁	2	4	8	14
C ₂	4	5	9	18
C ₃	4	3	10	17
C ₄	5	5	11	21
C ₅	2	1	2	6
D ₁	5	1	4	10
D ₂	1	–	7	8
D ₃	4	1	17	22
D ₄	–	4	11	15
D ₅	3	2	8	13

Традиційно вважається, що найбільша інтенсивність загоряння характерна для наземних лишайників і злакової рослинності (родини Тонконогових та Осокових), які переважно є ксерофітами. Проте до цієї групи належать також мохи і представники родини вересових – чорниця, брусниця, буяхи, журавлина. Незважаючи на те, що ці рослини належать до мезогігрофітів або гігрофітів, вони мають здатність швидко займатися та підтримувати горіння. Таке інтенсивне горіння цих рослин трапилося в аномально сухому 2015 р., коли після трьох місяців посухи полум'ям були охоплені величезні запаси як підстилки, так і живого надгрунтового вкриття, що складався з мохів та представників родини вересових. Під час експериментальних досліджень спостережено також горіння вересових у вегетуючому стані.

На процеси виникнення і поширення пожеж впливають також мікрокліматичні умови під наметом деревостану, які залежать від лісотипологічних особливостей ділянки лісу (напр., наявність галявин, вікон), а також лісівничої характеристики лісостану (вік, відносна повнота, зімкненість крон). За однакових погодних умов загалом відносна вологість повітря нижча, а температура – вища у дуже сухих, сухих і свіжих борових та суборових едафотоплах порівняно з вологими, сирими та мокрими сугрудами і грудками (Левченко та ін., 2015). Тобто основою для встановлення природної пожежної небезпеки повинні бути лісівничо-типологічні підходи.

Відповідно до особливостей лісостанів, усі типи лісу, що виділені в рівнинній частині України (Остапенко, Ткач, 2002), можна поділити за п'ятьма класами пожежної небезпеки. Поділ має такий вигляд.

1 клас. Сосняки: дуже сухий сосновий бір (А₀-С); сухий сосновий бір (А₁-С); сухий дубово-сосновий суббір (В₁-дС). **Дубняки:** дуже сухий дубово-сосновий суббір (В₀-дС); сухий дубово-сосновий суббір (В₁-дС); дуже суха пакленова судіброва (С₀-кпД); дуже суха пакленова діброва (D₀-кпД); дуже суха діброва з дубом пухнастим (D₀-Дп); суха пакленова судіброва (С₁-кпД); суха чорнокленова судіброва (С₁-ктД); суха скупієва судіброва (С₁-скД); суха судіброва з дубом скельним (С₁-Дск); суха грабова судіброва (С₁-гД); суха діброва з дубом пухнастим (D₁-Дп); суха чорнокленова діброва (D₁-ктД); суха берестово-пакленова діброва (D₁-бр-кпД); суха грабова діброва (D₁-гД); суха діброва з дубом скельним (D₁-Дск).

2 клас. Сосняки: свіжий сосновий бір (А₂-С); свіжий дубово-сосновий суббір (В₂-дС); свіжий буково-сосновий суббір (В₂-бкС); свіжий буково-сосновий сугруд (С₂-бкС); свіжий грабово-сосновий сугруд (С₂-гС). **Дубняки:** свіжий суббір з дуба скельного (В₂-Дск); свіжий заплавний осоковий суббір (В₂-Т³); свіжа пакленова судіброва (С₂-кпД); свіжа заплавна берестова судіброва (С₂-брД³); свіжа

грабова судіброва (C₂-гД); свіжа грабово-соснова судіброва (C₂-г-сД); свіжа липово-соснова судіброва (C₂-лп-сД); свіжа судіброва з дубом скельним (C₂-Дск); свіжий пристеловий дубово-сосновий сугруд (C₂-дС); свіжий заплавний в'язово-осоколевий сугруд (C₂-взТ³); свіжа заплавна судіброва (C₂-Д³); свіжа грабова діброва (D₂-гД); свіжа грабова діброва з дубом скельним (D₂-гДск); свіжа кленово-липова діброва (D₂-кл-лпД); свіжа ясеневоліпова діброва (D₂-яс-лпД); свіжа заплавна берестово-пакленова діброва (D₂-бр-кпД³). **Бучини:** свіжа дубово-грабова субчина (C₂-д-гБк); свіжа букова діброва (D₂-бкД); свіжа грабова бучина (D₂-гБк).

3 клас. Сосняки: вологий сосновий бір (A₃-С); вологий дубово-сосновий субір (B₃-дС); вологий ялиново-сосновий субір (B₃-ялС); вологий заплавний грабово-сосновий сугруд (C₃-гС³); волога липово-соснова судіброва (C₃-лп-сД); вологий дубово-сосновий сугруд (C₃-дС); вологий буково-сосновий сугруд (C₃-бкС); вологий заплавний в'язово-осоколевий сугруд (C₃-вз-Т³). **Дубняки:** вологий заплавний осоколевий субір (B₃-Т³); волога заплавна судіброва (C₃-Д³); волога заплавна грабова судіброва (C₃-гД³); волога грабово-соснова судіброва (C₃-г-сД); вологий вербо-тополевий сугруд (C₃-вТб); волога грабова діброва (D₃-гД); волога букова діброва (D₃-бкД); волога грабова бучина (D₃-гБк); волога кленово-липова діброва (D₃-кл-лпД); волога ясеневоліпова діброва (D₃-яс-лпД); волога заплавна в'язово-ясенева діброва (D₃-вз-Д³); волога заплавна в'язова діброва (D₃-взД³); волога берестово-пакленова діброва (D₃-бр-кпД).

4 клас. Сосняки: сирий дубово-сосновий субір (B₄-дС); сирий ялиново-сосновий субір (B₄-ялС); сирий березово-сосновий субір (B₄-бС); сирий

дубово-грабово-сосновий сугруд (C₄-г-дС); сирий ялиново-грабово-сосновий сугруд (C₄-ял-гС). **Дубняки:** сира грабова судіброва (C₄-гД); сира в'язово-ясенева діброва (D₄-вз-яД); сира грабова діброва (D₄-гД). **Вільшаники:** сирий чорновільховий сугруд (C₄-Влч); сирий чорновільховий груд (D₄-Влч) (ольс-лог).

5 клас. Мокрий березово-сосновий субір (B₅-бС); березово-соснове рідколісся дуже мокрого субору (B₆-бС^п); мокрий березово-сосновий сугруд – согра (C₅-бС); мокрий чорновільховий сугруд – мокра сувільшина (C₅-Влч); дуже мокрий вільхово-березовий сугруд (C₆-влчБп); мокрий чорновільховий груд (D₅-Влч) (ольс-болото).

Природна пожежна небезпека значно зростає у разі захаращення лісових насаджень (Левченко та ін., 2015). Захаращеність виникає внаслідок наявності рослинних решток великого розміру (сушняк, опалі сучки, сухостій, пні, порубкові рештки), які підсилюють інтенсивність горіння під час низових пожеж. У сосняках із захаращеністю 80 м³·га⁻¹ відпад після пожежі у чотири рази вищий, ніж із захаращеністю 20 м³·га⁻¹. Сильна захаращеність здатна настільки змінювати характер горіння, що в класифікації пожеж виділяють особливий вид низових пожеж – «сушнякові».

Грунтуючись на результатах досліджень, шкалу оцінювання природної пожежної небезпеки ділянок лісового фонду можна удосконалити наступним чином (табл. 2). Варто зауважити, що під час пожежного лісовлаштування доцільно окремо виділяти ділянки лісу зі значними запасами підстилки та фітомасою живого надґрунтового вкриття, які в сухі та аномально сухі роки будуть представляти собою надзвичайну пожежну загрозу.

Таблиця 2. Шкала оцінювання природної пожежної небезпеки ділянок лісового фонду

Table 2. Scale for assessing the natural fire hazard of forest fund plots

Клас пожежної небезпеки	Об'єкт загоряння (насадження у різних типах лісорослинних умов, категорії не вкритих лісовою рослинністю і нелісових земель)
1	2
1	- Насадження сосни звичайної, сосни кримської, сосни гірської, ялівцю в дуже сухих (0) і сухих (1) гігротопах - Дубові насадження в дуже сухих (0) і сухих (1) гігротопах - Незімкнуті лісові культури всіх порід із сильним заростанням ділянок злаками, осоками з міцними кореневищами – понад 50% площі - Зруби з-під хвойних порід після проведення суцільних рубок зі значним запасом порубкових решток (до 16 т/га) - Згарища, вітровали, буреломи та інші загиблі насадження із середньою та сильною захаращеністю від 10 м³·га⁻¹. Лісові насадження з рівнем радіаційного забруднення 15 Кі/км² і вище, незалежно від породного складу, віку і типу лісорослинних умов - Лишайниковий тип живого надґрунтового вкриття
2	- Соснові, ялинові та модринові насадження у свіжих борах (A₂), суборах (B₂), сугрудах (C₂) і грудах (D₂) - Захаращені насадження внаслідок усихання в осередках шкідників – менше 10 м³·га⁻¹ - Пройдені рубкою лісові насадження з неприбраними порубковими рештками - Сухомоховий тип живого надґрунтового вкриття

1	2
3	- Соснові ялинові та модринові насадження у вологих борах (A_3), суборах (B_3) і сугрудах (C_3) - Букові, ялинові, ялицеві, дубові, грабові насадження у вологих сугрудах (C_3) і грудах (D_3) - Осикові, вільхові насадження у вологих сугрудах (C_3) і грудах (D_3) - Вологомоховий тип живого надґрунтового вкриття
4	- Насадження хвойних порід у сирих борах (A_4) і суборах (B_4), мокрих борах (A_5), суборах (B_5) і сугрудах (C_5) - Заболочені осикові, вільхові насадження в мокрих сугрудах (C_4) і грудах (D_4) - Угіддя – сіножаті, пасовища - Лісові розсадники, плантації, сади, ягідники
5	- Насадження хвойних порід у мокрих борах (A_5), суборах (B_5) і сугрудах (C_5), дуже мокрих суборах (B_6) та сугрудах (C_6) - Не вкриті лісовою рослинністю землі (лісові шляхи, просіки, візири, протипожежні розриви) - Нелісові землі (окрім сіножатей, пасовищ, садів, ягідників) - Болотно-моховий тип живого надґрунтового вкриття

Окрім цього на один клас вище встановлюється пожежна небезпека для ділянок лісу: для хвойних насаджень, будова яких сприяє переходу низової пожежі у верхову; з високим (більше 2 м) густим підростом та підліском хвойних порід (ялівці та інші кущі); за захащеності понад $10 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$; ділянки, що прилягають до доріг та залізниць або розташовані на відстані до 50 м від підприємств, які використовують відкритий вогонь.

Дискусія (Discussion). У зв'язку зі зміною клімату для розуміння зміни активності лісових пожеж (Costa et al., 2020; Resco de Dios, & Nolan, 2021) зроблено акцент на безпосередньому впливі на пожежну небезпеку погоди та клімату країн Середземномор'я. За потенційного глобального потепління на 2°C зменшиться рівень вологості ЛГМ Середземноморського регіону: зона низької вологості поширюватиметься на північ від Середземного моря до центральної частини Європи. Р.М. Fernandes (2019) розглядає допустимі пороги поширеного показника пожежної небезпеки, індексів пожежної погоди (FWI), пов'язаних з лісовими пожежами різного масштабу в Португалії. V. Varela et al. (2020) використовують показник FWI для визначення майбутньої пожежної уразливості археологічних і туристичних місць у Греції. Водночас індекси пожежної небезпеки та поширення пожежі, які базуються лише на оцінюванні метеорологічних умов і вологості матеріалів, дають не завжди однозначні результати (Bedia et al., 2015; Ruffault et al., 2018; Di Giuseppe et al., 2020).

С.Г. Сидоренко та ін. (2023) вважають, що до національної шкали природної пожежної небезпеки не прив'язана горимість лісових насаджень. В той же час горимість лісів залежить не лише від природних характеристик ділянок лісового фонду, але й від комплексу антропогенних чинників. Тобто, це вже фактично не буде доповненням до іс-

нуючої шкали, а пропонується шкала матриці ризиків, тобто ймовірності виникнення пожежі, що дасть можливість істотно покращити ідентифікацію найбільш уразливих і небезпечних ділянок із високими пожежними ризиками. Такий підхід відповідає також концепції пожежних ризиків, прийнятих в Європі та деяких інших країнах світу. Під час планування захисту лісу від пожеж до уваги беруть класифікацію ландшафтів, які одночасно мають як найвищу пожежну небезпеку (потенційні наслідки пожежі), так і найвищу ймовірність виникнення пожеж (Karavani et al., 2018; Resco de Dios, 2020; Boer et al., 2021).

Інтенсивність пожеж залежить від просторової мінливості середземноморських типів рослинних угруповань, а їх відновлення тісно пов'язане зі спроможністю регенерації домінуючих видів (Jimeno-Llorente, Marcos, & Fernández-Guisuraga, 2023). За результатами дослідження лісових пожеж у Нижньосілезькому воєводстві Польщі встановлено, що найважливішими предикторами їх виникнення є наявність хвойного лісу та відстань до сільськогосподарських угідь (Kaczmarowski et al., 2023). Екстремальні пожежні погодні умови можуть посилюватися у разі високої зімкненості чагарникової рослинності із високою горимістю (Rodriguez-Jimenez et al., 2023).

Інтенсивність, вертикальне поширення і частота виникнення пожеж визначаються видовим складом, структурою лісової екосистеми та функціональними властивостями видів, що її складають. Часто лісові екосистеми із багатим біорізноманіттям є доволі пожежонебезпечними (Tianhua, Byron, & Pausas, 2019).

Українськими вченими (Кузик, 2019; Левченко та ін., 2015) для оцінювання природної пожежної небезпеки ділянок лісового фонду (соснових лісів) використано відношення рослинності до пожежної

небезпеки у межах типів лісу. Беручи до уваги результати цих напрацювань, пропонуємо здійснювати прогнозування пожежної ситуації за схемою: оцінювання загрози виникнення пожеж з урахуванням типу лісу → оцінювання пожежного ризику, пов'язаного з антропогенним фактором (поjawою джерел вогню, рекреаційним навантаженням тощо) → оцінювання впливу погодних умов на пожежну небезпеку.

Лісотипологічне оцінювання природної пожежної небезпеки лісів у рівнинній частині України дасть змогу розробити дієві практичні заходи та забезпечити оптимальне планування захисту лісу від пожеж.

Висновки (Conclusions). Природна пожежна небезпека лісу залежить від лісотипологічних особливостей ділянок, породного складу лісостанів, запасу підстилки та складу і запасу живого надґрунтового вкриття. Оцінювання пожежної небезпеки потрібно здійснювати з урахуванням складу і стану лісових насаджень та лісотипологічних умов.

Пірогенне пошкодження лісових насаджень залежить, насамперед, від запасів горючого матеріалу, основною складовою якого є лісова підстилка. Хоча у сосняках більші запаси підстилки нагромаджуються із зростанням гігروتону, проте у цих умовах підстилка набуває високої вологості і характеризується слабкою здатністю до загоряння.

Існує тісний взаємозв'язок між виникненням пожеж і лісотипологічними умовами. Найбільше представництво пожежонебезпечних трав'яних видів характерно для сухих гігروتонів. У вологих гігروتоніях до пожежонебезпечних видів віднесено також деякі мезогігрофіти або гігрофіти – мохи і види родини вересових, які, завдяки наявності в них ефірних олій, здатні швидко займатися.

Встановлення тривалого посушливого сезону зумовлює висихання величезних запасів мортмаси у вологих гігروتоніях, що є причиною виникнення надзвичайної пожежної загрози і навіть слабозаймисті та вогнестійкі види в сухому стані легко займаються.

Список літератури (References)

Ворон, В. П., Коваль, І. М., Сидоренко, С. Г., Мельник, Ю. Й., Ткач, О. М., Борисенко, ... Бологов, О. Й. (2021). *Пірогенна трансформація соснових лісів в Україні*. Харків: Нове слово. [Voron, V. P., Koval, I. M., Sidorenko, S. G., Melnyk, Y. Y., Tkach, O. M., Borysenko, V. G., ... Bologov, O. Y. (2021). *Pyrogenic transformation of pine forests in Ukraine*. Kharkiv: New word] (in Ukrainian)

Зібцев, С., Сошенський, О., Гуменюк, В., Богомолів, В. (2023). *План інтегрованого управління ландшафтними пожежами в Луганській області*. Київ: Редакційно-видавничий відділ НУБіП України. [Zibtsev, S., Soshenskyi, O., Humenyuk, V., &

Bogomolov, V. (2023). *Plan of integrated management of landscape fires in Luhansk region*. Kyiv: Editorial and publishing department of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Retrieved from https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u184/fmp_in_luhansk_oblast.pdf] (in Ukrainian)

Кузик, А. Д. (2019). *Еколого-лісівничі основи пожежної безпеки в лісових насадженнях Малої Полісся*. Львів: Сполом. [Kuzik, A. D. (2019). *Ecological and Forestry Foundations of Forest Fire Safety in the Small Polissya Region*. Lviv: Splom] (in Ukrainian)

Левченко, В. В., Борсук, О. А., Борсук, А. А. (2015). *Лісові горючі матеріали*. Київ: Редакційно-видавничий відділ НУБіП України. [Levchenko, V. V., Borsuk, O. A., & Borsuk, A. A. (2015). *Forest Combustible Materials*. Kyiv: Editorial and publishing department of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine] (in Ukrainian)

Остапенко, Б. Ф., Ткач, В. П. (2002). *Лісова типологія*. Харків: ХДАУ ім. В. В. Докучаєва [Ostapenko, B. F., & Tkach, V. P. (2002). *Forest Typology*. Kharkiv: the V. V. Dokuchaev Kharkiv State Agrarian University] (in Ukrainian)

Правила пожежної безпеки в лісах України (2024). Київ: Державне агентство лісових ресурсів України. Наказ від 27.12.2004 р. № 278. [Rules of fire safety in the forests of Ukraine (2024). Kyiv: State Agency of Forest Resources of Ukraine. Order dated 12/27/2004 No. 278. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0328-05>] (in Ukrainian)

Сидоренко, С. Г., Мельник, Є. Є., Боцула, О. І., Коваль, І. М., Ворон, В. П., Сидоренко, С. В., Гуржій, Р. В. (2023). Удосконалення методики оцінювання природної пожежної небезпеки ділянок лісового фонду на основі ризиків орієнтованого підходу. *Агроекологічний журнал*, 2, 74-82. [Sydorenko, S. G., Melnyk, E. E., Bocula, O. I., Koval, I. M., Voron, V. P., Sydorenko, S. V., & Gurzhii, R. V. (2023). Improving the methodology for assessing the natural fire danger of the forest fund areas based on a risk-oriented approach. *Agroecological Journal*, 2, 74-82. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.2.2023.283699>] (in Ukrainian)

Ходаков, В. Е., Жарикова, М. В. (2011). *Лесные пожары: методы исследования*. Херсон: Гринь Д. С. [Khodakov, V. E., & Zharikova, M. V. (2011). *Forest Fires: Research Methods*. Kherson: Hrin D. S.] (in Russian)

Bachmann, A. B., & Allgöwer, B. (2000). *The need for a consistent wildfire risk terminology*. In: Neuen-schwander, L., Ryan, K., Golberg, G. (Eds.). *Crossing the Millennium: Integrating Spatial Technologies and Ecological Principles for a New Age in Fire Management*. The University of Idaho and the International Association of Wildland Fire, Moscow, ID, pp. 67-77.

Barlow, J., Berenguer, E., Carmenta, R., & França, F. (2020). Clarifying Amazonia's burning crisis. *Global Change Biology*, 26(1), 319-321. <https://doi.org/10.1111/gcb.14872>

- Bedia, J., Herrera, S., Gutiérrez, J.M., Benali, A., Brands, S., Mota, B., & Moreno, J.M. (2015). Global patterns in the sensitivity of burned area to fire-weather: Implications for climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 214-215, 369-379. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.09.002>
- Boer, M.M., Nolan, R.H., Resco de Dios, V., Clarke, H., Price, O.F., & Bradstock, R.A. (2017). Changing weather extremes call for early warning of potential for catastrophic fire. *Earth's Future*, 5(11), 1196-1202. <https://doi.org/10.1002/2017EF000677>
- Boer, M.M., Resco de Dios, V., Stefaniak, E.Z., & Bradstock, R.A. (2021). A hydroclimatic model for the distribution of fire on Earth. *Environmental Research Communications*, 3(3), 035001. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/abe5ef>
- Costa, H., de Rigo, D., Libertà, G., Houston Durrant, T., & San-Miguel-Ayanz, J. (2020). *European wildfire danger and vulnerability in a changing climate: Towards integrating risk dimensions*. Publications Office of the European Union. Retrieved from <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC119980>
- Di Giuseppe, F., Vitolo, C., Krzeminski, B., Barnard, C., Maciel, P., & San-Miguel, J. (2020). Fire weather index: The skill provided by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts ensemble prediction system. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(9), 2365-2378. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-2365-2020>
- Fernandes, P.M. (2019). Variation in the Canadian fire weather index thresholds for increasingly larger fires in Portugal. *Forests*, 10(10), 838. <https://doi.org/10.3390/f10100838>
- Gómez-González, S., Ojeda, F., & Fernandes, P.M. (2018). Portugal and Chile: Longing for sustainable forestry while rising from the ashes. *Environmental Science & Policy*, 81, 104-107. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.11.006>
- Jimeno-Llorente, L., Marcos, E., & Fernández-Guisuraga, J. (2023). The effects of fire severity on vegetation structural complexity assessed using SAR data are modulated by plant community types in Mediterranean fire-prone ecosystems. *Fire*, 6(12), 450. <https://doi.org/10.3390/fire6120450>
- Kaczmarowski, J., Ciesielski, M., Trailović, Z., Mielcarek, M., Szczygieł, R., & Kwiatkowski, M. (2023). Modeling and mapping of forest fire occurrence in the Lower Silesian Voivodeship of Poland based on machine learning methods. *Forests*, 14(1), 46. <https://doi.org/10.3390/f14010046>
- Karavani, A., Boer, M.M., Baudena, M., Colinas, C., Díaz-Sierra, R., Pemán, J., de Luís, M., Enríquez-de-Salamanca, Á., & Resco de Dios, V. (2018). Fire-induced deforestation in drought-prone Mediterranean forests: Drivers and unknowns from leaves to communities. *Ecological Monographs*, 88(2), 141-169. <https://doi.org/10.1002/ecm.1289>
- Ma, W., Feng, Z., Cheng, Z., Chen, S., & Wang, F. (2020). Identifying forest fire driving factors and related impacts in China using random forest algorithm. *Forests*, 11(5), 507. <https://doi.org/10.3390/f11050507>
- McCarty, J.L., Smith, T.E.L., & Turetsky, M.R. (2020). Arctic fires re-emerging. *Nature Geoscience*, 13(9), 658-660. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0641-y>
- Nolan, R.H., Boer, M.M., Collins, L., Resco de Dios, V., Clarke, H., Jenkins, M., Kenny, B., & Bradstock, R.A. (2020). Causes and consequences of eastern Australia's 2019-20 season of mega-fires. *Global Change Biology*, 26(2), 1039-1041. <https://doi.org/10.1111/gcb.14987>
- Nolan, R.H., Blackman, C.J., Resco de Dios, V., Choat, B., Medlyn, B.E., Li, X., Bradstock, R.A., & Boer, M.M. (2020a). Linking forest flammability and plant vulnerability to drought. *Forests*, 11(8), 779. <https://doi.org/10.3390/f11080779>
- Pickrell, J., & Pennisi, E. (2020). Record U.S. and Australian fires raise fears for many species. *Science*, 370(6512), 18-19. <https://doi.org/10.1126/science.370.6512.18>
- Resco de Dios, V., & Nolan, R. (2021). Some challenges for forest fire risk predictions in the 21st century. *Forests*, 12(4), 469. <https://doi.org/10.3390/f12040469>
- Resco de Dios, V. (2020). *Plant-fire interactions. In Applying Ecophysiology to Wildfire Management*. Springer Nature. Retrieved from <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-41192-3>
- Rochmyaningsih, D. (2020). Scientists in Indonesia fear political interference. *Science*, 367(6478), 722. <https://doi.org/10.1126/science.367.6478.722>
- Rodriguez-Jimenez, F., Fernandes, P., Fernández-Guisuraga, J., Alvarez, X., & Henrique, L. (2023). Drivers and trends in the size and severity of forest fires endangering WUI areas: A regional case study. *Forests*, 14(12), 2366. <https://doi.org/10.3390/f14122366>
- Ruffault, J., Martin-StPaul, N., Pimont, F., & Dupuy, J.-L. (2018). How well do meteorological drought indices predict live fuel moisture content (LFMC)? An assessment for wildfire research and operations in Mediterranean ecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 262, 391-401. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.07.016>
- Tianhua, H., Byron, B., & Pausas, J.G. (2019). Fire as a key driver of Earth's biodiversity. *Biological Reviews*, 94(4), 1983-2010. <https://doi.org/10.1111/brv.12452>
- Varela, V., Vlachogiannis, D., Sfetsos, A., Politi, N., & Karozis, S. (2020). Methodology for the study of near-future changes of fire weather patterns with emphasis on archaeological and protected touristic areas in Greece. *Forests*, 11(11), 1168. <https://doi.org/10.3390/f11101168>

Forest fire hazard assessment based on forest typology

V.P. Voron¹, A.D. Kuzyk², S.V. Ivashyniuta³,
Y.R. Tsipan⁴

The study of forest fire prevalence in Ukraine in recent years has revealed severe challenges for the scientific community associated with the reduction of operational, nature protection, and recreational functions of forests. When assessing the potential fire hazards, a contradiction arises because the fire risk is minimal in wet hygrotopes, but on the other hand, the total supply of terrestrial combustible materials is greater in forest types with excessive soil moisture, where organic matter decomposes. In these conditions, along with the accumulation of fallen needles and branches, an important factor in the fire hazard is also the role of the live ground cover. It has been found that the development of new methodology for assessing fire danger is of significant importance for effective prevention of forest fires, which should be based not only on physical principles of fire break-out and spread but also on forest site conditions. One of the key aspects is examination the forest types in Ukraine and their relationship with the risk of forest fires. Based on experimental studies, the inflammability of herbaceous and moss plants within the Small Polissia region has been identified. Fire-prone species include 14 herbaceous plants from the *Poaceae* family (*Dactylis glomerata* L., *Koeleria glauca* (Spreng.) DC., *Stipa johannis* Cel., *Festuca ovina* L., *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth., *Dianthus arenarius* L., *Calamagrostis arundinacea* (L.) Roth., *Brachypodium pinnatum* P.B., *Molinia caerulea* (L.) Moench, *Melica nutans* L., *Milium effusum* L., *Phleum phle-*

oides Sm., *Poa nemoralis* L., *Deschampsia cespitosa* L.), 11 from the *Cyperaceae* family (*Carex limosa* L., *Carex inflata* Huds., *Carex pilosa* Scop., *Carex acutiformis* Ehrh., *Carex brevicollis* D.C., *Carex sylvatica* Huds., *Carex pseudocyperus* L., *Carex vesicaria* L., *Carex lasiocarpa* Ehrh., *Carex melanostachya* M.B., *Eriophorum vaginatum* L.), 4 herbaceous plants from the *Ericaceae* family (*Vaccinium vitis-idaea* L., *Vaccinium uliginosum* L., *Vaccinium oxycoccos*, *Vaccinium myrtillus* L.); 5 mosses (*Hylocomium splendens* (Hedw.) Schimp., *Dicranum undulatum* Ehrh., *Pleurozium schreberi* (Willd. Ex Brid., *Ptilium crista-casterensis* (Hedw.) De Not, *Cetraria islandica* (L.) Ach.), lichens of the genus *Cladonia* Nyl. and *Calluna vulgaris* (L.) Hill.

The greatest representation of fire-prone species was observed in dry pine forests (A₁), where out of 11 species, 8 have a high inflammability. These species are mostly grasses. In other forest conditions, this feature is not as pronounced. As humidity and nutrient levels increase, the number of less flammable and fire-resistant plants grows, while the number of fire-prone species decreases. However, regardless of their group, all plants in dry conditions easily catch fire during droughts. A significant representation of fire-prone species is also characteristic of wet and moist hygrotopes. Using the list of forest types by B.F. Ostapenko and V.P. Tkach (2002), the natural fire danger of pine forests was assessed. In doing so, ecological characteristics of vegetation of different forest types that have formed in the plains of Ukraine were taken into account, as well as the relationship between forest conditions and forest vegetation as combustible material to fire danger. The dependence of natural fire danger on forest typological features of stands, determined by the composition of tree species, litter stock, and density of live ground cover, has been investigated. Experimental studies of the burning of grassy and mossy plants within the Small Polissya region confirmed the presence of fire-prone species, especially in dry pine forests (A₁) and revealed the ability of certain plants to quickly catch fire and support burning. The results of the research made it possible to assign forest types to five classes of fire danger, as well as to improve the scale for assessing the natural fire danger of forest fund plots, considering forest types as inflammable objects. These data are crucial for the development of effective strategies to prevent and extinguish forest fires, these strategies being aimed at preserving natural ecosystems and protecting the environment.

Key words: forest fires; hygrotropism; trophotropism; combustible materials; litter; live ground cover; forest degradation; forest vegetation.

¹ Volodymyr P. Voron – Full Member of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine, Doctor habil. (Agricultural Sciences), Chief Researcher, the G.M. Vysotsky Ukrainian Research Institute of Forestry and Forest Melioration, 86 Hryhoriy Skovoroda st., Kharkiv, 61024, Ukraine. E-mail: 52corvus@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1059-3032>

² Andriy D. Kuzyk – Doctor habil. (Agricultural Sciences), professor, Lviv State University of Life Safety, Lviv, 79057, Ukraine. E-mail: andrij_k@yahoo.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0118-9493>

³ Sergiy V. Ivashyniuta – PhD in Agricultural Sciences, Nadsluchanskyi Institute of the National University of Water and Environmental Engineering, Berezne, 34600, Ukraine. E-mail: s.v.ivashyniuta@nuwm.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7397-2014>

⁴ Yilia R. Tsipan – Senior Research Officer, Nadsluchanskyi Institute of the National University of Water and Environmental Engineering, Berezne, 34600, Ukraine. E-mail: y.r.tsipan@nuwm.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7279-7416>