

УДК 528.88.04:629.783:(614.841.42:502.6)(477)

Ю. В. Костюченко¹, М. В. Ющенко¹, І. М. Копачевський¹, С. Левинський²

¹ Державна установа «Науковий Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України», Київ

² Центр космічних досліджень Польської академії наук, Варшава, Польща

МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОЇ ОЦІНКИ РИЗИКІВ ЛАНДШАФТНИХ ПОЖЕЖ ЗА ДАНИМИ СУПУТНИКОВИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Запропоновано підхід до оцінки ризиків ландшафтних пожеж, який дозволяє в рамках єдиної методології враховувати впливи різних компонентів, таких як традиційні фактори, що викликають надзвичайні ситуації в регіоні, довгострокові зміни клімату і довкілля, зміни метеорологічних показників, регіональні зміни екосистем та природокористування (що відбиваються, зокрема на динаміці природного пального). Запропоновано в явній формі рівняння для оцінки варіабельності метеорологічних умов та аналіз накопичення і динаміки властивостей природного пального. Проаналізовано зв'язок між змінними, що входять до базових рівнянь моделі оцінки ризиків та засобами контролю та супутниковими індикаторами, які можуть бути використані при модельних розрахунках, визначено перелік найбільш придатних індикаторів. Запропоновано враховувати ймовірність помилкової інтерпретації дистанційних даних при аналізі комплексних ризиків ландшафтних пожеж. До єдиного підходу включено компоненти для опису впливу пожеж на ризик забруднень атмосферного повітря та ризик для здоров'я населення. Результати можуть бути використані для побудови комплексної методики оцінки різночасових (включаючи довгострокові) регіональних ризиків ландшафтних пожеж.

ВСТУП

Мета роботи — окреслити єдині методологічні рамки оцінки інтегральних ризиків, як безпосередньо ландшафтних пожеж, так і їхніх соціально-екологічних наслідків. Проблематика, пов'язана з оцінками екологічних ризиків, вразливістю екосистем до зовнішніх навантажень [32, 41], зокрема з огляду на зміни довкілля [46], розробляється у світі протягом кількох останніх десятиліть. Розроблено кілька прикладних підходів [12, 19, 22], що дозволяють отримати кількісні оцінки ризиків, пов'язаних з небезпечними природними явищами. Розвиток сучасних знань про функціонування наземних систем, нові оцінки щодо перебігу та напряму змін довкілля і клімату, поява нових даних та способів їхньої обробки дають змогу розробити нові прикладні підходи оцінки ризиків, пов'язаних з окремими небезпечними явищами, які б повною мірою

відповідали цілям забезпечення сталого розвитку та безпеки суспільства [50]. Зважаючи на високу невизначеність екологічних моделей та їхню чутливість щодо вхідних даних [56], можна передбачити, що використання новітніх засобів моніторингу зможе забезпечити необхідний прогрес у галузі визначення відповідних ризиків. Тому запропонований підхід має бути орієнтований на використання даних як таких, що забезпечують найкращі можливості для моніторингу. Незважаючи на велику кількість робіт, присвячених моніторингу ландшафтних пожеж супутниковими засобами (див. огляд літературних джерел у роботах [23, 65]), проблема адекватної оцінки інтегральних ризиків пожеж, включаючи соціальні, екологічні, економічні наслідки в середньо- та довгостроковій перспективі залишається невирішеною. Успішно розв'язаною наразі можна вважати лише задачу детектування пожеж та посткризовий моніторинг (оцінку площ постраждалих територій, розподіл забруднень тощо) [65]. Ми спробуємо показати можливість отримання кількісних характеристик ризиків на

© Ю. В. КОСТЮЧЕНКО, М. В. ЮЩЕНКО,
І. М. КОПАЧЕВСЬКИЙ, С. ЛЕВИНСЬКИЙ, 2011

основі моделей природних систем та сценаріїв загрозливих явищ з урахуванням прогнозованих змін клімату, використовуючи супутникові спостереження Землі та полігонні дослідження.

МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ ОЦІНКИ РИЗИКІВ ЛАНДШАФТНИХ ПОЖЕЖ

Оцінка комплексного ризику є складною задачею, бо вимагає врахування довгострокових тенденцій змін та врахування недостатньо вивчених взаємозв'язків компонентів екосистеми [20]. У загальному випадку для визначення ризику ландшафтної пожежі можна запропонувати рівняння у вигляді [18]

$$R(t) = f_A(R^L(t), R_0(t)) \iint_{xy} \int_{t_0}^t p(v) f(x, y, v) dt dx dy. \quad (1)$$

Тут $f_A(R^L(t), R_0(t))$ — апроксимаційна функція впливу, яка описує відносну взаємодію короткочасових та довготривалих факторів впливу на формування пожежної небезпеки, вона може бути представлена, в залежності від моделі, у будь-якому вигляді, навіть як лінійна суперпозиція відповідних ймовірностей, v — ефективна швидкість поширення пожежі, $p(v)$ — ймовірність негативного впливу за умов настання визначених умов, $R_0(t)$ — загальна (середня) ймовірність події, $R^L(t)$ — ризик настання події, пов'язаний з ескалацією довгострокових змін середовища, $f(x, y, v)$ — функція поширення небезпечного процесу.

Визначення складових наведеного рівняння є основною задачею дослідження.

Згідно з даними [20] загальна ймовірність події визначається, рівнянням у формі [42]:

$$R_0(t) = H \cdot \iint_{S_{xy}} \int_0^{t_{\max}} \int_{I_{\min}} f_v(I) \cdot \psi(x, y) \times f^\alpha(I, \psi) dI dt dx dy, \quad (2)$$

де S_{xy} — територія дослідження, $\psi(x, y)$ — ділянка, за якою проводиться моделювання, I — інтенсивність пожежі, $f^\alpha(\psi, I)$ — ймовірнісний розподіл впливів у межах ділянки $\psi(x, y)$, $f_v(I)$ — функція збитку, параметричний опис негативно-

го впливу, H — функція ризику, яка визначається із статистики надзвичайних ситуацій в регіоні.

Таким чином, постає питання коректного аналізу статистичних даних про виникнення пожеж у природних системах в досліджуваних регіонах.

Для аналізу екологічних (і навіть соціально-екологічних) ризиків, пов'язаних із довгостроковими змінами клімату і довкілля, за базову будемо використовувати модель стохастичної оптимізації у вигляді, запропонованому у роботі [19]. Ця модель дозволяє успішно оперувати потрібними параметрами, в тому числі враховувати можливість колапсу екосистеми через коливання параметрів зовнішнього впливу, що є актуальним у випадку пожеж.

У загальному випадку для опису довгострокового ризику можна використати форму, яка враховує розподіли важливих факторів впливу [18] та в цілому відповідає загальному підходу оцінки соціально-екологічних ризиків [2]:

$$R^L(t) = \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^J P_n(t, Q_n) P(Q_n / Q_j) F(Q_j). \quad (3)$$

Тут Q_j ($j = 1, 2, \dots, J$) — відомі (розраховані, відповідно до прогнозних моделей) фактори впливу, що пов'язані з довгостроковими екологічними та кліматичними змінами, $F(Q_j)$ — прогнозований (розрахований за сценарними моделями) розподіл частоти та інтенсивності довгострокових впливів.

Це рівняння описує ризик настання наслідків, які можна інтерпретувати як негативні (наприклад, зниження біологічної продуктивності екосистем, посухи тощо) за відомих розподілів довгострокових екологічних і кліматичних змін [38].

Використання цього рівняння вимагає наявності коректних даних про зміни кліматичних показників у досліджуваному регіоні та прогнозів щодо їхніх змін з визначеною достовірністю.

Найважливішим питанням залишається проблема визначення в явному вигляді ймовірності негативного впливу за умов настання визначених умов та функції поширення процесу пожежі. Ймовірність реалізації негативного впливу надзвичайної ситуації за умов настання визначених умов у випадку ландшафтної пожежі може бути

визначена через ймовірність реалізації відповідних погодних умов, що сприяють виникненню та поширенню пожежі. Розглянемо рівняння, що описують виникнення та поширення пожежі в термінах температури за фіксованих умов (відсутність вітру та нахилів поверхні) [11]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -k(T - T_a) + K \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - Q \frac{\partial \sigma_v}{\partial t}. \quad (4)$$

При цьому $\sigma_v = \sigma_{v0}$ для $T < T_{ign}$ та $\sigma_v = \sigma_{v0} e^{-\alpha(t-t_{ign})}$ для $T \geq T_{ign}$, $T(x, y, t) = T_a$ на границі комірки моделювання, $T(x, y, t) \geq T_a$ у межах ділянки горіння, $T(x, y, 0) = T_a$ на ділянках без горіння при $t = 0$, T_a — середня температура середовища (як правило, 20 — 30 °С), T_{ign} — температура горіння (близько 300 °С), T — температура; t — час горіння, K — температуропровідність (м²/с), Q — приведена ентальпія горіння (м² К/кг), α — постійна горіння (с⁻¹), σ_v — маса рослинності, приведена по поверхні (кг/м²), σ_{v0} — початкова (до початку горіння) маса рослинності, приведена по поверхні (кг/м²). Складова $k(T - T_a)$ представляє тепловий обмін з повітрям, $K \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)$ — дифузію, а $Q \frac{\partial \sigma_v}{\partial t}$ — енергію реакції запалювання.

У цьому рівнянні температура горіння може контролюватися через температуру насичення термальних каналів супутникових сенсорів, а маса рослинності на одиниці площі може бути розрахована через вегетаційні індекси.

Впливу вітру можна виразити через напівемпіричне рівняння [51]:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \frac{\mathbf{A}^T \mathbf{A} \mathbf{n}}{\|\mathbf{A} \mathbf{n}\|} + \mathbf{C}, \quad (5)$$

де

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} b \cos \theta & -a \sin \theta \\ a \sin \theta & b \cos \theta \end{pmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{pmatrix} c \sin \theta \\ c \cos \theta \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Тут t — час, θ — напрям вітру, a , b , c — велика і мала півосі, а також фокальний параметр еліпса поширення вогню, велика піввісь якого збігається з напрямом вітру.

За поширення пожежі відповідає розподіл природного пального у межах досліджуваної ділянки. Згідно з даними [9, 53] ця величина визначається через глибину шару горючої речовини,

відношення площі, зайнятої займистою речовиною, до об'єму, відношення маси мертвої до живої займистої речовини, вміст вологи у мертвій та живій речовині, теплоємність речовини, розрахована на елементарні частини (в загальному випадку розраховується відповідно до класів рослинності). Більшість із цих показників може бути прямо чи непрямо контрольована дистанційними методами.

Неважко помітити, що врахування варіабельності метеорологічних умов та аналіз накопичення та динаміки властивостей природного пального є взаємопов'язаними питаннями. З точки зору систем спостереження доцільніше виглядає розділення на спостереження за варіаціями метеорологічних умов для визначення періодів найбільшої пожежної небезпеки та моніторинг динаміки природного пального в екосистемах. Але для розробки теоретико-методичних основ оцінки інтегральних ризиків, важливою є можливість опису ймовірності негативного впливу за умов настання визначених умов та функції поширення процесу пожежі у рамках єдиної моделі. Грунтуючись на класичному підході [52] та використовуючи базові моделі [66], можна запропонувати комплексне рівняння, що описує швидкість L (м/с) поширення фронту пожежі в екосистемах, враховуючи всі необхідні фактори:

$$L = \frac{I_R \xi (1 + \varphi_w + \varphi_s)}{\rho_b \varepsilon Q_{ig}}, \quad (7)$$

$$I_R = \Gamma' w_n h \eta_M \eta_s. \quad (8)$$

Тут $\Gamma' = \Gamma'(\delta, \sigma, \rho_p, w_0)$ [с⁻¹] — оптимальна швидкість реакції, що є функцією товщини δ шару природного пального, відношення σ площі, зайнятої палаючою речовиною, до її об'єму, щільності ρ_p сухої речовини пального та загальної кількості w_0 пального на одиниці площі, $w_n = w_n(w_0, S_T)$ [кг/м²] — чиста кількість пального на одиниці площі, (S_T — вміст мінеральних речовин в пальному), h [ккал/кг] — теплоємність природного пального, $\eta_M = \eta_M(P, m_d, m_l)$ — безрозмірний коефіцієнт зволоження (P — відношення мас мертвої та живої займистої речовини, m_d та m_l — вміст вологи у мертвій та живій речовині відповідно), $\eta_s = \eta_s(S_T)$ — коефіцієнт мінералізації, $\xi = \xi(\delta, \sigma, \rho_p, w_0)$ — коефіцієнт розпов-

сюдження, $\varphi_w = \varphi_w(\delta, \sigma, \rho_p, w_0, v)$ — вітровий коефіцієнт (v — швидкість вітру), $\varphi_s = \varphi_s(\delta, \sigma, \rho_p, w_0, \text{tg}\alpha)$ — коефіцієнт схилу ($\text{tg}\alpha$ — тангенс кута нахилу рельєфу), $\rho_\beta = \rho_\beta(\delta, \sigma, \rho_p, w_0)$ [кг/м³] — щільність пальної речовини в сухому стані, $\varepsilon = \varepsilon(w_0)$ — коефіцієнт ефективності горіння, $Q_{ig} = Q_{ig}(m_d)$ [кДж/кг] — теплота запалювання [53].

У більшості випадків ризику пожеж описують рівняннями (7)—(8), використовуючи спрощену форму, в якій параметри горіння описуються середнім розподілом деревини за класами рослинності [45].

Таким у явній формі можна представити рівняння, що описує ризик ландшафтних пожеж.

Сукупність наведених рівнянь (1)—(8) дозволяє визначати ризик ландшафтних пожеж з урахуванням впливів кількох різнорідних факторів, таких як традиційні фактори, що викликають надзвичайні ситуації в регіоні, довгострокові зміни клімату і довкілля, зміни метеорологічних показників, регіональні зміни екосистем та природокористування (що відбиваються, зокрема, на динаміці природного пального).

ПРИНЦИПИ ДЕТЕКТУВАННЯ ПОЖЕЖ

Як було відмічено вище, детектування пожеж та кризовий моніторинг є найбільш успішно розв'язаними задачами. Наразі існує багато методик детектування пожеж, більшість з яких ґрунтується на визначенні місць горіння за температурою за даними супутникової зйомки у тепловому діапазоні (див. MODIS Web [http://modis.gsfc.nasa.gov/]; National Fire Danger Rating System [http://www.wrh.noaa.gov/sew/fire/olm/nfdrs.htm] та деякі інші роботи). Вони, як правило, базуються на використанні рівняння (2), тобто на визначенні різниці температур, що відповідає ділянкам горіння, за даними теплового каналу супутникових спостережень.

З точки зору задачі визначення ризиків проблема детектування пожеж є важливою перш за все з огляду на необхідність формування масивів коректних статистичних даних про пожежі. По-друге, методика детектування пожеж має враховувати ризик розпізнавання, який впливатиме на достовірність статистичних даних, що у свою чергу вплине на значення інтегральних ризиків пожеж.

Розглянемо найбільш характерний вид методу детектування пожеж за даними супутникових зйомок. Пожежі, що виникають в природних системах, є явищем з відносно очевидними ознаками, серед яких слід виділити підвищення температури поверхні та наявність (у більшості випадків) диму. Методи детектування пожеж базуються на використанні аномальних теплових характеристик поверхні, які визначено рівнянням (4). Тому методи детектування мають базуватися на аналізі температур яскравості в окремих спектральних каналах. Температура поверхні, відповідно до калібрувальних умов більшості супутникових сенсорів, визначається з виразу [28]:

$$T = \frac{hc}{k\lambda} \cdot \frac{1}{\ln(2hc^2\lambda^{-5}L^{-1} + 1)} \quad (9)$$

Тут h — постійна Планка (Дж·с), c — швидкість світла у вакуумі (м/с), k — газова константа Больцмана (Дж/К), λ — довжина хвилі (м), T — яскравісна температура (К), L — яскравість ділянки (Вт·м⁻²стер⁻¹м⁻¹), яка визначається коефіцієнтом відбиття r_λ . Важливим показником є температура насичення — максимально можлива температура, яку можна практично зафіксувати на певній довжині хвилі. Температуру яскравості, яка відповідає умовам горіння і може бути зафіксована в певних спектральних каналах (наприклад, для сенсорів MODIS це канали № 21 і 22), позначимо як T_f [27].

Виходячи з наявності підвищеної температури як інформативної ознаки пожежі, слід використовувати спектральні канали, центральна довжина хвилі яких розташована в області більшої довжини хвиль. У більшості досліджень [17, 35] використовують спектральні канали, які мають центральну довжину хвилі 11 і 12 мкм та температуру насичення близько 400 К. Позначимо температури яскравості цих каналів як T_λ (зокрема, виміряну в 11-му каналі як T_{11}). Будемо оперувати також коефіцієнтом відбиття r_λ , який вимірюється на певних довжинах хвиль (зазвичай це $\lambda = 650, 860$ та 2100 нм). Відмітимо, що різні канали зазвичай мають різне розрізнення, і тому для практичного використання дані, отримані в цих каналах, мають бути перераховані на регулярну сітку.

Надалі детектування пожеж складається з набору нескладних процедур. Важливою задачею є визначення хмарного покриву. Слід зазначити, що задача відокремлення хмарного покриву, особливо з метою його подальшого вивчення, загалом не вирішена, але є кілька загальноприйнятих методів, прийнятних для нашого випадку. Для денних зйомок будемо вважати вкритою хмарами ту область зображення, яка відповідає таким умовам [57]: $r_{650} + r_{860} > 0.9$ та $T_{12} < 265 \text{ К}$; або $r_{650} + r_{860} > 0.7$ та $T_{12} < 285 \text{ К}$. Для нічного часу єдиною ознакою хмар може бути умова [27] $T_{12} < 265 \text{ К}$.

Надалі провадиться проблемно-орієнтована класифікація космічного зображення, а саме виділення пікселів, в межах яких з певною ймовірністю можуть знаходитися ділянки пожеж, тобто клас «пожежі». Ця класифікація ґрунтується на можливості детектування різниці сигналу, зареєстрованого у середньому інфрачервоному та довгохвильовому інфрачервоному діапазонах (для сенсора MODIS це 21-й (4 мкм) та 31-й (11 мкм) канали). Ненормальна різниця між випромінюванням цих каналів буде свідчити про високі температури на поверхні, які можуть бути викликані пожежею [17, 27].

В якості правила для попереднього віднесення піксела до класу «пожежі» у денний час використовуємо дані [27, 35]:

$$\begin{aligned} T_f &> 360 \text{ К}, \\ \Delta T &> 10 \text{ К}, \\ r_{860} &< 0.3, \end{aligned} \quad (10)$$

де $\Delta T = T_f - T_{11}$, а для нічної зйомки —

$$T_f > 320 \text{ К}. \quad (11)$$

Зазначимо, що нічними зйомками будемо вважати такі, що отримані при значенні сонячного зенітного кута $z \geq 85^\circ$.

Таким чином, через використання процедури порогової фільтрації визначаються місця потенційних пожеж. На подальших етапах обробки відбувається уточнення, тобто звуження класу «пожежі» за рахунок виключення можливих помилок ідентифікації та врахування можливих особливостей земної поверхні. На цьому етапі можуть бути зафіксовані всі види верхових лі-

сових пожеж, сильні низові пожежі (як рухливі, так і стійкі), та степові пожежі (особливо великі та великі). При цьому здатність реєстрації невеликих пожеж обмежена розрізненням вхідних даних.

Наступним кроком є визначення локальних спектральних особливостей поверхні та реєстрація пожеж за непрямыми ознаками. Задачею цього етапу аналізу зображень є уточнення попереднього віднесення до класу пожеж через оцінку радіометричного сигналу потенційної пожежі при відсутності сигналу активної пожежі з використанням аналізу найближчих пікселів. Такий підхід дозволяє визначити пожежі при відсутності явного горіння, тобто низові пожежі слабкої та середньої сили, великі підземні лісові пожежі, побічні пожежі, плямисті пожежі та місця масштабного тління.

Для цього аналізується ділянка знімку фіксованого розміру (від 3×3 до 21×21 пкл, в залежності від наявних обчислювальних потужностей) з центром у місці потенційної пожежі. Відповідно до попередніх процедур придатні до аналізу пікселі у цьому вікні, що окреслюють місце пожежі, мають бути вільними від хмар, перебувати на поверхні суходолу та не мати похибок сигналу (тобто, не належати класу «втрачених даних»).

Введемо правило, за яким будемо розрізняти потенційну пожежу. Будемо вважати, що центральний піксел належить класу «пожежа», якщо сигнал у сусідніх пікселях задовольняє вимоги [27, 28]:

$$T_f > 325 \text{ К}, \Delta T > 20 \text{ К} \text{ (вдень)} \quad (12)$$

та

$$T_f > 310 \text{ К}, \Delta T > 10 \text{ К} \text{ (вночі)}.$$

Введення вікна для аналізу сукупностей сусідніх пікселів дозволяє оперувати статистичними показниками. Будемо використовувати середні значення та середні відхилення показників, а саме: \bar{T}_{11} та δ_{11} — відповідно середнє значення та середнє відхилення для T_{11} ; \bar{T}_f та δ_f — середнє значення та середнє відхилення для T_f ; $\Delta \bar{T}$ та $\delta_{\Delta T}$ — середнє значення та середнє відхилення для ΔT для сусідніх пікселів. Крім того, виключно для пікселів, що задовольняють умови (12), введемо середнє значення \bar{T}'_f та середнє відхилення

δ'_f для зафіксованої T_f . Введемо правила для подальшого аналізу супутникової інформації:

$$\Delta T > \Delta \bar{T} + 3.5\delta_{\Delta T}, \quad (13)$$

$$\Delta T > \Delta \bar{T} + 6 \text{ К}, \quad (14)$$

$$T_f > \bar{T}_f + 3\delta_{\Delta T}, \quad (15)$$

$$T_{11} > \bar{T}_{11} + \delta_{11} - 4 \text{ К}, \quad (16)$$

$$\delta'_f > 5 \text{ К}. \quad (17)$$

Зображення має бути проаналізоване на виконання умов (13)–(17). Правила, за якими визначатимемо пожежі, в такому разі будуть такі:

1. Будемо фіксувати пожежу в денний час зйомки, якщо виконується умова (10), або умови (13)–(15) при одночасному виконанні умови (17). В іншому випадку не реєструємо пожежу.

2. В нічний час фіксуємо пожежу при виконанні умови (11) або умов (13)–(15). В іншому випадку не реєструємо пожежу.

Якщо для перевірки виконання умов недостатньо пікселів у вікні, то слід використовувати лише умови (10) і (11).

Використання описаного підходу, зокрема аналіз вікна фіксованого розміру, має приховані можливості помилкового розпізнавання. Найбільш очевидними є визначення як пожеж відблисків від сонця з поверхні невеликих водних об'єктів, помилки, пов'язані з переходом від водної поверхні до суходолу та від місць, вкритих рослинністю до оголених ґрунтів (на кордонах пустельних регіонів).

Відблиски від Сонця можна усунути, якщо використати кут θ_g між лінією «супутник — земля поверхня» і напрямом дзеркального відбиття, який визначається як $\cos \theta_g = \cos \theta_v \cdot \cos \theta_s - \sin \theta_v \cdot \sin \theta_s \cdot \cos \varphi$, де θ_v — кут огляду, θ_s — кут стояння Сонця, φ — відносний азимутальний кут. Розглянемо такі правила: $\theta_g < 2^\circ$; або $\theta_g < 8^\circ$, $r_{650} > 0.2$, $r_{2100} > 0.12$, або $\theta_g < 12^\circ$, якщо у вікні є пікселі, віднесені до класу «вода». Якщо хоча б одна з цих умов виконується, піксел має бути виключений з класу «пожежі» та визначатися як сонячний відблиск [27].

Для аналізу можливості помилкового віднесення до класу «пожеж» гарячих місць пустельних регіонів, розглянемо такі правила: $N_f > 0.1N_v$,

$N_f \geq 4$, $r_{860} > 0.15$, $\bar{T}'_f < 345 \text{ К}$, $\delta'_f < 3 \text{ К}$, $T_f < \bar{T}'_f + 6\delta'_f$. Тут N_v — загальна кількість пікселів у вікні, N_f — кількість пікселів у вікні, які віднесені до класу «пожежі». Якщо наведені вище правила виконуються, піксел має бути виключений з класу «пожежі» та визначатися як помилка реєстрації [44].

Наступна можливість помилкового розпізнавання полягає в тому, що маскування води може бути виконаним недосконало, що призведе до великої різниці між T_4 і T_{11} у місцях переходу від води до суходолу (у прибережних зонах), тобто до помилкового визначення пожежі. Для запобігання цьому введемо правило додаткового розпізнавання води: $r_{2100} < 0.05$, $r_{860} < 0.15$, і $(r_{860} - r_{650}) / (r_{860} + r_{650}) < 0$. Якщо дана умова виконується, ми відносимо цей піксел до класу «вода».

Розглянемо параметри достовірності детектування пожеж. Для цього введемо такі параметри [27]:

$$z_f = (T_f - \bar{T}_f) / \delta_f, \quad z_{\Delta T} = (\Delta T - \Delta \bar{T}) / \delta_{\Delta T}. \quad (18)$$

Крім того, введемо параметричну функцію [16]

$$S(x; \alpha; \beta) = \begin{cases} 0; & x \leq \alpha, \\ (x - \alpha) / (\beta - \alpha); & \alpha < x < \beta, \\ 1; & x \geq \beta. \end{cases} \quad (19)$$

Достовірність реєстрації пожежі може розглядатися як комбінація достовірностей $C_1 = S(T_f; 310 \text{ К}; 340 \text{ К})$, $C_2 = S(z_f; 2,5; 6)$ та $C_3 = S(z_{\Delta T}; 3; 6)$, значення яких змінюються у межах від 0 (найнижча достовірність) до 1 (найвища достовірність) [27]. Загальна достовірність в найпростішому випадку може бути тут визначена як геометричне середнє, тобто: $C = \sqrt[3]{C_1 C_2 C_3}$. Для нічного часу поріг C_1 може бути апроксимований як $C_1 = S(T_4; 305 \text{ К}, 320 \text{ К})$.

Рішення про наявність пожежі має прийматися відповідно до експертно встановленого порогу достовірності, який у загальному випадку залежить від природних умов регіону, техногенної навантаженості та сезону спостережень (тобто динамікою та вмістом забруднювальних речовин у повітрі та характерними розподілами температури і вологості повітря). Так можна описати

найпростіший алгоритм визначення ландшафтних пожеж за даними ДЗЗ.

Зазначимо, що наведений алгоритм є методикою класифікації космічних знімків з навчанням, яка дозволяє визначити клас пікселів «пожежі» для різних типів земних покривів, що характеризуються розподілами показників T_λ і r_λ . Проведена таким чином процедура класифікації космічного зображення дозволяє розрахувати ймовірність віднесення некласифікованих пікселів до класу пожеж, тобто формально оцінити ймовірність виникнення пожежі у межах ділянок, що безпосередньо оточують район пожежі. Особливо це важливо у випадках, коли розподіл спектральних характеристик поверхні є неоднорідним. В такому випадку можна скористатися правилом, що базується на використанні вагової функції Гауса:

$$P_b(x, y) = (P_{\max} - P_{\min}) \exp\left(\frac{d_b^2}{2\sigma_p^2}\right) + P_{\min} \quad (20)$$

Тут $P_b(x, y)$ — ймовірність наявності (або виникнення в масштабах часу періоду спостережень) пожежі, P_{\max} — максимально можлива ймовірність наявності пожежі в досліджуваному місці (незарєєстрованої алгоритмом детектування), яка залежить від типу сенсора, фізико-географічних особливостей регіону та типу поверхні (наприклад, для сенсора MODIS P_{\max} приймається 0.4—0.5), P_{\min} — мінімальна ймовірність (для сенсора MODIS P_{\min} приймається 0.03—0.05), $d_b(x, y)$ — відстань від найближчого місця пожежі, σ_p — емпіричний показник (для сенсора MODIS в районах помірного клімату та змішаних лісів σ_p приймається близько 5 км) [29].

Виходячи із статистичного характеру дистанційної інформації та беручи до уваги характер наведених алгоритмів, що використовуються для визначення пожеж, можна також запропонувати використовувати загальне рівняння, що описує ризик, пов'язаний із помилковим розпізнанням [8]:

$$r(\delta) = \int \sum_{i=1}^I L(i, k = \delta(x)) P(i) p(x|i) dx \quad (21)$$

Тут X — простір сигналів x , що розпізнаються, $i = 1, \dots, I$ — номери істинних класів сигналів,

$k = 1, \dots, K$ — номери відповідей алгоритму розпізнавання δ ; $L(i, k)$ — втрати у разі віднесення сигналу класу i до класу k ; $P(i)$ — відомі апіорні ймовірності класів; $p(x|i)$ — відомі апіорні щільності ймовірності кожного класу. Отриману за наведеним рівнянням величину математичного сподівання втрат від помилкового розпізнавання необхідно враховувати при визначенні достовірності статистичних даних про пожежі в рамках отримання оцінок інтегральних ризиків ландшафтних пожеж.

Крім того, кризовий та посткризовий моніторинг дозволяє отримати калібрувальні дані для моделей поширення пожежі за наведеними вище рівняннями [43, 48], а також отримати дані для оцінки економічних і прямих екологічних збитків [30].

ВХІДНІ ПАРАМЕТРИ МОДЕЛІ ТА СПЕКТРАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗЕМНИХ ПОКРИВІВ

Рівняння (2) і (7) — (8) визначають залежність виникнення пожежі на певних проміжках часу від наявності пожеж на досліджуваній ділянці (статистики випадків) та типу поверхні (зокрема, за набором ознак рослинного та ґрунтового покриву). Для опису типу поверхні введемо інтегрований індикатор — індекс спектрального відбиття SRI , який буде представлено комбінацією спектральних характеристик в окремих смугах спектру r_λ . В залежності від контрольованого параметру будь-який із відомих спектральних індексів може бути використаний як такого роду інтегрований індикатор. Враховуючи можливість отримання багаторазових довгострокових зйомок, можна ввести індекс, що відобразить зміни досліджуваних спектральних показників за період спостережень — нормований індекс. Нормований індекс спектрального відбиття можна запропонувати у формі

$$SRI_i^* = 100 \left(\frac{\max\{SRI_i\} - SRI_i}{\max\{SRI_i\} - \min\{SRI_i\}} \right) \quad (22)$$

Тоді інформативною ознакою можна вважати різницю $\Delta SRI^* = SRI^* - SRI_i^*$ між середнім по періоду спостережень значенням та зафіксованим на момент зйомки значенням SRI_i^* . Вибір конкретного вигляду індексу спектрального

відбиття SRI залежить від задачі, що вирішується. Так, наприклад, для короткочасових періодів (до 5 — 7 діб) у роботі [29] запропоновано вираз

$$SRI_{day} = \frac{(r_{1200})_{day} - (r_{2100})_{day}}{(r_{1200})_{day} + (r_{2100})_{day}}. \quad (23)$$

Для аналізу триваліших проміжків часу можна запропонувати вирази, що базуються на використанні:

а) вегетаційного індексу, приведеного на вплив атмосферних забруднень $ARVI$ [36]:

$$SRI_i^{ARVI} = \frac{(r_{800})_i - (2(r_{680})_i - (r_{450})_i)}{(r_{800})_i + (2(r_{680})_i - (r_{450})_i)}, \quad (24)$$

б) нормалізованого багатосмугового індексу посушливості $NMDI$ [63]:

$$SRI_i^{NMDI} = \frac{(r_{860})_i - ((r_{1640})_i - (r_{2130})_i)}{(r_{860})_i + ((r_{1640})_i - (r_{2130})_i)}, \quad (25)$$

в) абсорбційного індексу целюлози CAI [15]:

$$SRI_i^{CAI} = \frac{(r_{2000})_i - (r_{2200})_i}{(r_{2100})_i}. \quad (26)$$

Крім того, важливою є необхідність контролю змінних, що входять до рівнянь (7)—(8), аналіз яких потребує детального вивчення спектральних характеристик земних покривів.

Розв'язування рівнянь (2)—(8) залежить від можливості отримати значення основних функцій. При цьому слід зазначити, що змінні, які входять до цих функцій, мають бути рівномірно розподілені у часі і просторі, можливість чого найкраще задовольняється за допомогою використання всієї сукупності наявних засобів ДЗЗ. У таблиці наведено перелік вхідних параметрів моделі та відповідні дистанційні індикатори.

Засоби контролю та супутникові індикатори параметрів моделей оцінки ризиків ландшафтних пожеж

Вхідні параметри моделі	Індикатор та засіб контролю
P (відношення маси мертвої до живої пальної речовини)	$ARVI = \frac{r_{NIR} - (2r_{RED} - r_{BLUE})}{r_{NIR} + (2r_{RED} - r_{BLUE})}$ [36], $NDVI = \frac{r_{NIR} - r_{RED}}{r_{NIR} + r_{RED}}$ [33], $NDVI_{705} = \frac{r_{750} - r_{705}}{r_{750} + r_{705}}$ [55], $NDLI = \frac{\lg(1/r_{1754}) - \lg(1/r_{1680})}{\lg(1/r_{1754}) + \lg(1/r_{1680})}$ [54], $NDNI = \frac{\lg(1/r_{1510}) - \lg(1/r_{1680})}{\lg(1/r_{1510}) + \lg(1/r_{1680})}$ [24], калібровані за даними наземних полігонних вимірювань
σ , m^{-1} (відношення площі, зайнятої займистою речовиною, до її об'єму)	$SIPI = \frac{r_{800} - r_{445}}{r_{800} - r_{680}}$ [49], $NDLI$, калібрований за даними наземних полігонних вимірювань
m_i (вміст вологи у живій речовині природного пального)	Водні індекси $MSI = \frac{r_{1599}}{r_{819}}$ [13], $NDVI_{705}$, $SIPI$, $NDLI$, калібровані за даними наземних полігонних вимірювань
m_d (вміст вологи у мертвої речовині природного пального)	MSI , $SIPI$, $NDLI$, $NDWI = \frac{r_{857} - r_{1241}}{r_{857} + r_{1241}}$ [26], калібровані за даними наземних полігонних вимірювань

Вхідні параметри моделі	Індикатор та засіб контролю
S_f (вміст мінеральних речовин у пальному)	<i>NDNI</i> ; польові дослідження, лабораторні вимірювання
w_0 , кг/м ² (загальна кількість пального на площу ділянки)	$NDVI, EVI = g \left(\frac{r_{NIR} - r_{RED}}{r_{NIR} + 6r_{RED} - 7.5r_{BLUE} + 1} \right) [31],$ $PRI = \frac{r_{531} - r_{570}}{r_{531} + r_{570}} [25], NDNI, NDLI,$ калібровані за даними наземних полігонних вимірювань
α , град (кут нахилу рельєфу)	Супутникові дані SRTM [21]
θ , град (напрямок вітру)	Наземний метеорологічний моніторинг
a, b, c , м (велика і мала півосі та фокальний параметр еліпса поширення вогню)	Супутникові спостереження в оптичному діапазоні високого розрізнення
σ_v , кг/м ² (поточна маса рослинності на одиницю поверхні)	<i>NDVI, PRI, EVI</i> , калібровані за даними наземних полігонних вимірювань
Початкова (до початку горіння) маса рослинності на одиницю поверхні σ_{v0} , (кг/м ²)	<i>NDVI, PRI, EVI</i> , калібровані за даними наземних полігонних вимірювань
Розподіл кліматичних показників по регіону досліджень за архівними даними	Метеорологічний моніторинг
Розподіл прогнозованих змін кліматичних показників по регіону досліджень	Моделі кліматичних змін HADCM3, NCAR IM/LCM, та інші [14].
Розподіл прогнозованої частоти та інтенсивності довгострокових впливів (км ² рік ⁻¹)	Моделі кліматичних та соціально-економічних змін SRES, IS та інші [14].
Розподіл частоти та інтенсивності надзвичайних ситуацій по регіону досліджень за архівними даними (км ² рік ⁻¹)	Наземні спостереження, супутникові дані систем моніторингу надзвичайних ситуацій [60]
T_a , °C (середня температура середовища)	$MSI, TCI = 100 \left(\frac{\max\{r_{therm}\} - r_{therm}}{\max\{r_{therm}\} - \min\{r_{therm}\}} \right)$
h , ккал/кг (теплоємність природного пального)	Польові дослідження, лабораторні вимірювання
δ , м (товщина шару природного пального)	<i>EVI, NDLI, SIPI</i> , калібровані за даними наземних полігонних вимірювань
v , м/с (швидкість вітру)	Метеорологічний моніторинг
ρ_p , кг/м ³ (щільність горючої речовини в природному вигляді у висушеному стані)	Польові дослідження, лабораторні вимірювання
ρ_p , кг/м ³ (щільність сухої речовини пального)	$EVI, CAI = g \left(\frac{r_{2000} - r_{2200}}{r_{2100}} \right) [15], NDWI$

Примітка: r_λ — коефіцієнт відбиття у відповідній смузі спостереження (центр смуги сенсора: *NIR* = 800 нм, *RED* = 680 нм, *BLUE* = 450 нм, *therm* = 12 мкм), g — напівемпіричний розрахунковий коефіцієнт, що залежить від властивостей сенсора («gain factor»)

Таким чином, виходячи із загальної методології, визначеної рівняннями (1), (2), і (4), на якій побудовано алгоритмічні процедури (10)—(17), а також ґрунтуючись на визначеній загальною моделлю (7)—(8) ймовірності (20), можна оцінити зв'язок змін земних покривів за набором спектральних характеристик (22)—(26) з ймовірністю виникнення ландшафтною пожежі.

Рівняння, що визначає ймовірність пожежі, виходячи з сукупності спектральних характеристик досліджуваних класів земної поверхні, згідно з [29] можна запропонувати у вигляді

$$P(B|\Delta SRI^*(x,y)) = \frac{P_I(\Delta SRI^*|B)P_b(x,y)}{P_I(\Delta SRI^*|B)P_b(x,y) + P_I(\Delta SRI^*|U)P_u(x,y)}. \quad (27)$$

Тут індекс B позначає клас «пожежі», а індекс U — клас пікселів, у яких пожеждостовірно немає (визначається за процедурами (10) — (17)). Ймовірність $P_b(x,y)$ визначається рівнянням (20). Співвідношення ймовірностей $P_b(x,y)$ та $P_u(x,y)$ визначається як $\lim_{x,y,i} (P_b(x,y)_i + P_u(x,y)_i) = 1$, тобто на достатньо великих періодах спостережень можна вважати, що $P_u(x,y)_i = 1 - P_b(x,y)_i$.

Сукупність наведених індикаторів та методів визначення модельних змінних можуть бути використані для побудови комплексної методики оцінки різночасових (включаючи довгострокові) регіональних ризиків ландшафтних пожеж. Задача полягає у виборі оптимального набору індикаторів (спектральних індексів SRI_i^N) для кожного періоду i зйомки, типів сенсорів та регіону досліджень.

Контроль такої кількості різномірних параметрів є складною задачею як методично, так і технологічно, тому зазвичай системи спостережень розподіляються на моніторинг середньо- і довгострокових змін земних покривів, динаміки природного пального та контролю пожежонебезпечних метеорологічних умов.

ОЦІНКА СОЦІАЛЬНО-ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ

У загальному випадку ризику, що виникають внаслідок дії факторів ураження, можна умовно інтерпретувати як прямі наслідки події (прямі ризику), тобто незворотні негативні зміни, що

призводять до безпосереднього пригнічення (або загибелі) компонентів екосистеми, та відкладені ризику, пов'язані з порушеннями функціонування екосистеми як цілого, тобто порушенням зворотних зв'язків в екосистемі, внаслідок чого порушується екологічний баланс і може відбутися деградація екосистеми.

Прямі наслідки, як правило, є достатньо вивченими експериментально [9]; існує значний обсяг емпірично отриманих залежностей для різноманітних факторів впливу та різних біологічних видів. Це дозволяє формалізувати екологічний ризик, пов'язаний з прямими наслідками технологічних катастроф, як абсолютне збільшення кількісного показника незворотних негативних змін під дією комплексного фактору впливу у вигляді, що загалом логічно впливає із запропонованого у [3] підходу:

$$R^*(t, Q_n) = \int \sum_{n \in N} P(t, Q_n) f(t, Q_n^*) dt. \quad (28)$$

Тут Q_n — фактор впливу ($n = 1, 2, \dots, N$), Q_n^* («ефективний летальний вплив») — фактор впливу, розрахований за окремими показниками досліджуваної системи (за набором впливів для визначеного набору видів конкретної екосистеми), $f(t, Q_n^*)$ — функція розподілу ефективних факторів впливу у часі, що інтерпретується як додатковий абсолютний ризик незворотної деградації компонентів екосистеми, $P(t, Q_n)$ — ймовірність компенсувати негативні наслідки враження протягом часу t , що пройшов після моменту катастрофи t_0 .

Іншою важливою загрозою, пов'язаною з ландшафтними пожежами, є забруднення повітря. Задача оцінки ризиків атмосферних забруднень істотно відрізняється від задачі поширення забруднень у повітрі [37]. Розрахунок ризику поширення забруднень атмосферного повітря внаслідок техногенної аварії будемо здійснювати відповідно до підходу, запропонованого у роботі [64]:

$$R(t) = P(t) \iint_S \int_{v_0}^{v_{\max}} p(v) \phi(x,y) f(x,y,v) dv dx dy. \quad (29)$$

Тут $P(t)$ — ймовірність виникнення події, пов'язаної з викидом певної кількості забруднювача (суміші забруднювачів) на території площі S

з координатами x, y ; v — ефективна швидкість поширення забруднення; $p(v)$ — ймовірність враження (в загальному випадку — ймовірність реалізації негативного впливу, але в найпростішому випадку може інтерпретуватися як ймовірність забруднення певного рівня концентрації); $f(x, y, v)$ — функція розподілу забруднення, що визначається, як правило, класичними рівняннями [7]; t — час (період, по якому проводиться моделювання). Функція розподілу забруднення $f(x, y, v)$ визначається відповідно до задачі.

Наприклад, можна використовувати найпростіше одновимірне рівняння поширення забруднення в атмосфері [4], яке базується на моделі Паскуїлла — Гіффорда:

$$v(t)d(t - t_0) = dx, \quad (30)$$

де v — швидкість переносу фронту забруднення (швидкість вітру), t — час з моменту аварії t_0 , x — горизонтальна координата. Ця емпірична модель офіційно використовується МАГАТЕ для оцінок забруднень площ з характерними лінійними розмірами близько 10 км, але цілком коректно працює для відстаней до 100 км. Більш точним є тривимірне рівняння розподілу забруднень в атмосфері параболічного типу [5, 59]:

$$\frac{\partial C(x, y, z^*, t)}{\partial t} + v(x, y, z^*, t) \text{grad} C(x, y, z^*, t) - \text{div} D \text{grad} C(x, y, z^*, t) = Q(T, t). \quad (31)$$

Тут D — коефіцієнт турбулентного переносу, C — концентрація забруднювача, Q — інтенсивність джерела забруднення, z^* — вертикальна координата, приведена на рельєф z_0 з урахуванням ефективної висоти рослинності, T — температура (в загальному випадку маємо розраховувати $T(t - t_0)$). Так можна визначити ризик забруднення атмосферного повітря внаслідок ландшафтної пожежі.

Важливим випадком, пов'язаним із розповсюдженням небезпечних речовин, є ризик виникнення ускладнень для здоров'я людини (повної або часткової втрати працездатності протягом певного періоду, виникнення або загострення/ускладнення вже наявного певного захворювання, що може призвести до загибелі протягом періоду, що розглядається) внаслідок забруднення

навколишнього середовища, зокрема повітря та шляхом переносу з повітря, сумішшю речовин, що є продуктами горіння.

Для оцінки впливів на здоров'я людини можна використати загальне рівняння ризику, запропоноване в роботі [37], що базується на підході [58]:

$$R(t) = \sum_{n \in N} W_{n,t} P(M_{x,y}(\partial t), Q_n) P(Q_n / HI) HI(t). \quad (32)$$

Інша можлива (більш загальна) форма [39]:

$$R(t) = \int_0^{\infty} \sum_{n \in N} W_{n,t} P(M_{x,y}(\partial t), Q_n) P(Q_n / HI) HI(t) dt. \quad (33)$$

Тут M — кількість постраждалих на території враження с координатами x, y , ∂t — показник віку постраждалих на момент враження (як правило, розглядаються категорії до 15 років, дорослі від 15 до 55 років і старші за 55 років), $W_{n,t}$ — емпіричний ваговий коефіцієнт враження тканин та органів (залежить від вікової категорії постраждалих на момент розрахунку t та ефективного експозиційного впливу [1]), Q_n — фактор впливу ($n = 1, 2, \dots, N$; n є кількістю речовин суміші забруднювачів), t — час, що пройшов після моменту катастрофи t_0 , HI — показник небезпеки (*hazard index*) суміші забруднювачів (розраховується відповідно до [61, 62]).

Як було показано на конкретних прикладах [37, 39], такий підхід дозволяє отримати кількісні оцінки ризику для здоров'я людини забруднень за окремими показниками для визначених проміжків часу.

ЗАКЛЮЧНІ ЗАУВАЖЕННЯ

Підвищена кількість та інтенсивність пожеж в природних системах, що спостерігається протягом останніх років, є значною екологічною, економічною та соціальною загрозою. Сукупність наведених рівнянь дозволяє визначити ризик ландшафтних пожеж з урахуванням впливів кількох різнорідних факторів, таких як традиційні фактори, що викликають надзвичайні ситуації в регіоні, довгострокові зміни клімату і довкілля, зміни метеорологічних показників, регіональні

зміни екосистем та природокористування (що відбиваються, зокрема, на динаміці природного пального). Запропоновано в явній формі рівняння для оцінки варіабельності метеорологічних умов та аналіз накопичення та динаміки властивостей природного пального. До єдиного підходу включено компоненти для опису впливу пожеж на ризик забруднень атмосферного повітря та ризик для здоров'я населення.

В рамках викладеного підходу можна також запропонувати кілька спрощень наведених рівнянь. Так, апроксимаційна функція впливу $f_A(R^L(t), R_0(t))$ із рівняння (1), яка описує відносну взаємодію короточасових та довготривалих факторів впливу на формування пожежної небезпеки, може бути представлена, в рамках статистичної моделі врахування довгострокових впливів у вигляді кореляції $R_0(\tilde{T}, \tilde{P}r, t)$, де \tilde{T} — середня температура повітря протягом кроку моделі за період моделювання, $\tilde{P}r$ — середня кількість опадів протягом кроку моделі за період моделювання, t — час.

Крім того, постає питання використання вузькосмугових індексів при застосуванні супутникових спостережень. Тут можна запропонувати використовувати можливості гіперспектральної зйомки, комбінації сенсорів та широке використання наземних польових вимірювань. Але в цьому випадку постає питання точного та адекватного визначення напівемпіричних розрахункових коефіцієнтів — «gain-факторів», що залежать від властивостей сенсорів. Іншим шляхом є запропонований у роботі [39] метод перерахунку вузькосмугових індексів в індекси, редуковані до властивостей наявних систем спостереження.

Таким чином, сукупність наведених індикаторів та методів визначення модельних змінних мають бути використані для побудови комплексної методики оцінки різночасових (включаючи довгострокові) регіональних ризиків ландшафтних пожеж. При цьому провідною є роль польових полігонних досліджень, в першу чергу досліджень спектральних характеристик типових наземних об'єктів, необхідних для коректної верифікації моделей та калібрування даних супутникових спостережень.

Загальний аналіз наведених рівнянь показує, що ризики пожеж на періодах в кілька діб генеруються варіабельністю локальних метеофакторів: температури повітря, кількості опадів та характеристик вітру; протягом сезону ризики контролюються річною мінливістю кліматичних показників: динамікою опадів, варіабельністю середніх та максимальних і мінімальних температур, показників посушливості; на періодах до 10 років ризики генеруються змінами ландшафтної структури, зокрема, динамікою рослинності, в тому числі антропогенно індукованою; на періодах від 10 до 30 років компоненти R^L і R_0 рівняння (1) практично зрівнюються, а на більших часових масштабах ризики генеруються вже переважно довготривалими змінами клімату і довкілля. Однак при цьому ризики, що генеруються довгостроковими змінами, у рівнянні (15) зростають швидше, і їхня роль збільшується.

Детальні регіональні розрахунки з використанням наведених рівнянь та аналіз сценаріїв динаміки ризиків пожеж на основі конкретних даних є предметом подальших досліджень.

1. Алымов В. Т., Тарасова Н. П. Техногенный риск: анализ и оценка. — М.: ИКЦ «Академкнига». — 2005. — 118 с.
2. Елохин А. Н., Бодриков О. В., Ульянов С. В. Методология комплексной оценки природных и техногенных рисков для населения регионов России // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. — 1996. — 3. — С. 3 — 10.
3. Лисиченко Г. В., Забулонов Ю. Л., Хміль Г. А. Природный, техногенный та екологічний ризики: аналіз, оцінка, управління. — Київ: Наук. думка, 2008. — 542 с.
4. Методика прогнозирования масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте: Рук. документ РД 52.04.253-90. — Л.: Гидрометеоиздат, 1990.
5. Перри С. Г. Модель диффузии ЕРА для сложного рельефа: структура и характеристики // Междунар. конф. ВМО по моделированию загрязнения атмосферы и его применениям. — Л.: Гидрометеоиздат, 1986. — С. 14—15.
6. Портер У. Современные основания общей теории систем. — М.: Наука, 1971. — 556 с.
7. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. — М.: Гостехиздат, 1953. — 314 с.

8. *Энциклопедия кибернетики* / Под ред. В. М. Глушкова. — К.: Гл. ред. Укр. сов. энцикл., 1974. — Т. 2. — 620 с.
9. *Albini F. A.* Estimating wildfire behavior and effects // Gen. Tech. Rep. INT-30. — Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. — 1976. — 92 p.
10. *Anthes R. A., Hsie E. Y., Kuo Y. H.* Description of the Penn State/NCAR Mesoscale Model Version 4 (MM4) // NCAR Techn. Note. — Boulder, CO: Natl Cent. For Atmos. Res., 1987. — NCAR/TN-282+STR. — 70 p.
11. *Balbi J. H., Santoni P. A., Dupuy J. L.* Dynamic modelling of fire spread across a fuel bed // Int. J. Wildland Fire. — 1998. — 9, N 4. — P. 275—284.
12. *Bartell S. M., Gardner R. H., O'Neill R. V.* Ecological risk estimation. — Boca Raton, FL: Lewis Publs, 1992.
13. *Ceccato P., Flasse S., Tarantola S., et al.* Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain // Remote Sens. Environ. — 2001. — 77. — P. 22—33.
14. *Climate Change 2001. The scientific basis* // Report of the intergovernmental panel on climate change. — Cambridge: Univ. Press, 2001. — 83 p.
15. *Daughtry C. S. T., Hunt Jr. E. R., McMurtrey III J. E.* Assessing crop residue cover using shortwave infrared reflectance // Remote Sens. Environ. — 2004. — 90. — P. 126—134.
16. *Devore J. L.* Probability and statistics for engineering and the sciences. — Monterey: Brooks & Cole Publ., 1987. — 672 p.
17. *Dozier J.* A method for satellite identification of surface temperature fields of subpixel resolution // Remote Sens. Environ. — 1981. — 11. — P. 221—229.
18. *Ermoliev Y.* Stochastic quasigradient methods: applications // Encyclopedia of Optimization / Eds C. Floudas, P. Pardalos. — New York: Springer Verlag, 2009. — P. 3801—3807.
19. *Ermoliev Y., Hordijk L.* Global changes: facets of robust decisions // Coping with uncertainty, modeling and policy issues / Eds K. Marti, Y. Ermoliev, G. Pflug, M. Makowski. — Berlin: Springer-Verlag, 2006. — P. 4—28.
20. *Ermoliev Yu., Detlof von Winterfeldt.* Risk, security and robust solutions // IIASA Interim Report. — 2010. — IR-10-013, IIASA. — 41 p.
21. *Farr T. G., Rosen P. A., Caro E., et al.* The shuttle radar topography mission // Revs Geophys. — 2007. — 45. — RG2004. doi:10. 1029/2005RG000183.
22. *Fisher S. G., Woodmansee R.* Issue paper on ecological recovery // Ecological risk assessment issue papers. — Washington, DC: Risk Assessment Forum, U.S. Environmental Protection Agency, 1994. — 7. — P. 1—54. — EPA/630/R-94/009.
23. *Flannigan M. D., Vonder Haar T. H.* Forest fire monitoring using NOAA satellite AVHRR // Can. J. Forest Res. — 1986. — 16. — P. 975—982.
24. *Fourty T., Baret F., Jacquemoud S., et al.* Leaf optical properties with explicit description of its biochemical composition: direct and inverse problems // Remote Sens. Environ. — 1996. — 56. — P. 104—117.
25. *Gamon J. A., Serrano L., Surfus J. S.* The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types and nutrient levels // Oecologia. — 1997. — 112. — P. 492—501.
26. *Gao B. C.* Normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // Proc. SPIE. — 1995. — 2480. — P. 225—236.
27. *Giglio L., Desloires J., Justice C. O., Kaufman Y. J.* An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS // Remote Sens. Environ. — 2003. — 87. — P. 273—282.
28. *Giglio L., Kendall J. D., Justice C. O.* Evaluation of global fire detection algorithms using simulated AVHRR infrared data // Int. J. Remote Sens. — 1999. — 20. — P. 1947—1985.
29. *Giglio L., Loboda T., Roy D. P., et al.* An active-fire based burned area mapping algorithm for the MODIS sensor // Remote Sens. Environ. — 2009. — 113. — P. 408—420
30. *Heo J., Park J. S., Song Y.-S., et al.* An integrated methodology for estimation of forest fire-loss using geospatial information // Environ Monit Assess. — 2008. — 144. — P. 285—299. — DOI 10. 1007/s10661-007-9992-8.
31. *Huete A. R., Liu H., Batchily K., van Leeuwen W.* A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS // Remote Sens. Environ. — 1997. — 59. — P. 440—451.
32. *Hunsaker C. T., Graham R. L., Suter G. W., et al.* Assessing ecological risk on a regional scale // Environ Manage. — 1990. — 14. — P. 325—332.
33. *Jackson R. D., Slater P. N., Pinter P. J.* Discrimination of growth and water stress in wheat by various vegetation indices through clear and turbid atmospheres // Remote Sens. Environ. — 1983. — 15. — P. 187—208.
34. *Jones R. G., Murphy J. M., Noguier M.* Simulation of climate change over Europe using nested regional climate model. I: Assessment of control climate, including sensitivity to location of lateral boundaries // Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. — 1996. — 77. — P. 1413—1449.
35. *Kaufman Y. J., Justice C. O., Flynn L. P., et al.* Potential global fire monitoring from EOS MODIS // J. Geophys. Res. — 1998. — 103. — P. 215—238.
36. *Kaufman Y. J., Tanre D.* Strategy for direct and indirect methods for correcting the aerosol effect on remote sensing: from AVHRR to EOS-MODIS // Remote Sens. Environ. — 1996. — 55. — P. 65—79.

37. *Kostyuchenko Yu. V.* Coupled modeling, “In-field, and Earth observation data analysis for emergency response optimization” // Paper presented at Coping with Uncertainty: Robust Decisions IFIP/IASA/GAMM Workshop Proc., Luxenburg, Austria, Dec., 2007. — 17 p.
38. *Kostyuchenko Yu., Bilous Yu.* Long-term forecasting of natural disasters under projected climate changes in Ukraine // Regional aspects of climate-terrestrial-hydrologic interactions in non-boreal eastern Europe / Ed. by P. Ya. Groisman, S. V. Ivanov. — Springer, 2009. — P. 95—102.
39. *Kostyuchenko Yu. V., Kopachevsky I., Solovyov D., et al.* Way to reduce the uncertainties on ecological consequences assessment of technological disasters using satellite observations // Proc. of the 4th International Workshop on Reliable Engineering Computing “Robust Design — Coping with Hazards, Risk and Uncertainty” (March 3—5, 2010, Singapore). — Singapore: National University of Singapore, 2010. — P. 765—776.
40. *Kostyuchenko Yu., Márton L., Yuschenko M., et al.* Transboundary socio-ecological safety assessment: sustainability toward anthropogenic hazards and bioproductivity degradation // Proc. 4th Int. Workshop on Reliable Engineering Computing: Robust Design — Coping with Hazards, Risk and Uncertainty, March 3 — 5, 2010. — Singapore: National University of Singapore, 2010. — P. 777—797
41. *Ludwig J. A., Reynolds J. F.* Statistical ecology. — New York: Wiley-Interscience, 1988. — 337 p.
42. *Lyalko V. I., Kostyuchenko Yu. V., Márton L., et al.* EO capabilities for analysis of climate related socio-ecological risks: bio-productivity, desertification, and natural disasters // Proc. of Advanced Research Workshop “Using Satellite and In Situ Data to Improve Sustainability” (June 9—12, 2009, Kiev). — Kiev, 2009. — P. 56—58.
43. *Manolakos E., Manatakis D., Xanthopoulos G.* Temperature field modeling and simulation of wireless sensor network behavior during a spreading wildfire // Proc. of 16th European Signal Proc. Conf. (EUSIPCO 2008) (August 25—29, 2008, Lausanne, Switzerland). — Lausanne, 2008. — 5 p.
44. *Martin M. P., Ceccato P., Flasse S., Downey I.* Fire detection and fire grows monitoring using satellite data // Remote Sensing of Large Wildfires / Ed. by E. Chuvieco. — Berlin: Springer-Verlag, 1999. — P. 101—122.
45. *Olabarria J. R. G.* Integrating fire risk into forest planning: Academic Dissertation, Dissertationes Forestales 23, University of Joensuu. — Helsinki: The Finnish Society of Forest Science, 2006. — 36 p.
46. *O’Neill B., Ermoliev Y., Ermolieva T.* Endogenous risks and learning in climate change decision analysis // Coping with uncertainty: modeling and policy issues / Eds K. Marti, Y. Ermoliev, M. Makowski, G. Pflug. — Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2006. — P. 283—289.
47. *O’Neill R. V., Gardner R. H., Barnthouse L. W., et al.* Ecosystem risk analysis: a new methodology // Environ Toxicol Chem. — 1982. — **1**. — P. 167—177.
48. *Pastor E., Zárate L., Planas E., Arnaldos J.* Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behaviour // Progr. Energy and Combustion Sci. — 2003. — **29**. — P. 139—153.
49. *Penuelas J., Baret F., Filella I.* Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll a ratio from leaf spectral reactance // Photosynthetica. — 1995. — **31**. — P. 221—230.
50. *Regulation (EU) N 911/2010* of the European Parliament and the Council on the European Earth monitoring programme (GMES) and its initial operations (2011 to 2013) // Offic. J. Eur. Union. — 20.10.2010. — P. L 276/1—L 276/10.
51. *Richards G. D.* A general mathematical framework for modeling two-dimensional wildland fire spread // Int. J. Wildland Fire. — 1995. — **5**. — P. 63—72.
52. *Rothermel R. C.* A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels // Res. Pap. INT-115. Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden (UT). — 1972. — 40 p.
53. *Salvador R., Piñol J., Tarantola S., Pla E.* Global sensitivity analysis and scale effects of a fire propagation model used over Mediterranean shrublands // Ecol. Model. — 2001. — **136**. — P. 175—189.
54. *Serrano L., Penuelas J., Ustin S. L.* Remote sensing of Nitrogen and Lignin in mediterranean vegetation from AVIRIS data: decomposing biochemical from structural signals // Remote Sens. Environ. — 2002. — **81**. — P. 355—364
55. *Sims D. A., Gamon J. A.* Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages // Remote Sens. Environ. — 2002. — **81**. — P. 337—354.
56. *Smith E. P., Shugart H. H.* Issue paper on uncertainty in ecological risk assessment // Ecological risk assessment issue papers. — Washington, DC: Risk Assessment Forum, U. S. Environmental Protection Agency, 1994. — Vol. 8. — P. 1—53. — EPA/630/R-94/009.
57. *Stroppiana D., Pinnock S., Gregoire J.-M.* The global fire product: daily fire occurrence from April 1992 to December 1993 derived from NOAA AVHRR data // Iner. J. Remote Sens. — 2000. — **21**. — P. 1279—1288.
58. *Suter G. W., Vermeire T., Munns Jr. W. R., Sekizawa J.* Framework for the integration of health and ecological risk assessment // Hum. Ecol. Risk Assess. — 2003. — **9**. — P. 281—301.

59. *Techniques* and decision making in the assessment of of-site consequences of an accident in a nuclear facility // Safety ser. — 1987. — N 86. — 185 p.
60. *The use of Earth observing satellites for hazard support: assessments & scenarios* // CEOS / NOAA. — 2001. — 218 p.
61. U.S. EPA. Considerations for developing alternative health risk assessment approaches for addressing multiple chemicals, exposures and effect (external review draft). — Washington, D. C.: U. S. Environmental Protection Agency, 2006. — 384 p. — (EPA/600/R-06/014A).
62. U.S. EPA. Exposure factors handbook. — Washington, D. C.: Environmental Protection Agency, 1996. — 712 p. — (EPA/600/8-89/043 U. S. Environmental Protection Agency).
63. Wang L., Qu J. J. NMDI: a normalized multi-band drought index for monitoring soil and vegetation moisture with satellite remote sensing // Geophys. Res. Lett. — 2007. — L20405. — 34 p.
64. Wang P. K. G. Control of distributed parameter systems // Advances in Control Systems. — New York: Academ. Press, 1964. — Vol. I. — 216 p.
65. Weaver J., Lindsey D., Bikos D. Fire detection using GOES rapid scan imagery // Weather and Forecasting. — 2004. — 19. — P. 496—510.
66. Wu Y., Sklar F. H., Gopu K., Rutchey K. Fire simulations in the everglades landscape using parallel programming // Ecol. Model. — 1996. — 93. — P. 113—124.

Надійшла до редакції 06.09.11

*Yu.V. Kostyuchenko, M.V. Yushchenko,
I.M. Kopachevskyi, S. Levynsky*

A PROCEDURE FOR INTEGRATED ASSESSMENT OF LANDSCAPE FIRE RISK USING REMOTE SENSING DATA

We propose an approach to the assessment of landscape fire risk which allows one, within the framework of a comprehensive methodology, to take into account the impact of different components, such as traditional factors causing emergencies in a region, long-term climate and environmental changes, changes in meteorological parameters, and changes in regional ecosystems and nature management (which reflected, in particular, on the dynamics of natural fuels). We propose in direct form an equation for variability of meteorological conditions as well as an analysis of natural fuel accumulation and its dynamics properties. The relationship is analyzed between variables of basic equations of the risk model and satellite indicators that can be used in model calculations. A list of the most suitable existing indicators is created. We propose to take into account the probability of false interpretation of remote sensing data in analyzing the complex risk of landscape fires. The integrated approach proposed includes also air pollution risk and social risk connected with landscape fires. Our results can be used for the development of a comprehensive procedure for multi-term (including long-term) regional fire risk assessment.