УДК 911.1+504.054.36

Ю. В. БУЦ, канд. геогр. наук, доц.
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна,
61022 Харків, пл. Свободи, 6
buyuv@mail.ru

ПРО МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОЖЕЖ В ПРИРОДНИХ ЕКОСИСТЕМАХ

Представлено проблему виникнення пожеж в природних екосистемах. Проведено узагальнення та наведено класифікацію математичних моделей щодо виникнення та поширення ландшафтних пожеж.

Проаналізовано математичні моделі створені вітчизняними науковцями за останні роки. З'ясовано, що наукові дослідження пов'язані з математичним моделюванням пожеж в природних екосистемах мають здебільше прикладне значення, що спрямовані на забезпечення пожежної безпеки лісів і ліквідацію ландшафтних пожеж.

Ключові слова: екосистема, математична модель, пожежа

БУЦ Ю.В. О МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ПОЖАРОВ В ПРИРОДНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ

Представлена проблема возникновения пожаров в природных экосистемах. Проведено обобщение и приведена классификация математических моделей относительно возникновения и распространения ландшафтных пожаров.

Проанализированы математические модели созданные отечественными учеными за последние годы. Выяснено, что научные исследования связанные с математическим моделированием пожаров в природных экосистемах имеют преимущественно прикладное значение, направлены на обеспечение пожарной безопасности лесов и ликвидацию ландшафтных пожаров.

Ключевые слова: экосистема, математическая модель, пожар

Buc Yu. V. FIRE RELAXATION OF GEOSYSTEMS ABOUT MATHEMATICAL DESIGN OF FIRES IN NATURAL ECOSYSTEMS

The problem of fires in natural ecosystems is presented. Generalization is conducted and classification of mathematical models that has deal with and distribution of landscape firesis resulted .

Mathematical models that were created domestic scientists in the last few years are analysed. It is found out that scientific researches are related to the mathematical design of fires in natural ecosystem and have the mainly applied value, and were directed on providing of fire safety of the forests and liquidation of landscape fires.

Keywords: ecosystem, mathematical model, fire

Вступ

Постановка проблеми. Одним з найважливіших екологічних чинників, що впливають на екосистеми, разом з температурним режимом, освітленістю, зволоженням і едафічними умовами, є вогонь. Пожежі, що повторюються неодноразово на певній території, в сучасному природокористуванні оцінюються як екзогенний локально-катастрофічний чинник, що призводить до трансформації природних екосистем. Пожежі виникають з природних причин, так і з вини людини. У останньому випадку причиною пожежі можуть бути як випадковість, так і навмисний підпал.

Проблема зростання площ пожеж в природних екосистемах України насьогодні досягає загальнонаціонального масштабу. Варто згадати пожежі лісових масивів на Херсонщині (2007, 2012рр.), на Кримському

© Буц Ю. В., 2012

півострові (2007, 2012рр.), заповідні території «Асканії-Нової» (2005, 2009рр.) та ін. Детально статистично-аналітична інформація про виникнення і поширення пожеж в природних екосистемах на достатньому рівні висвітлена засобах інформації [14]. Проте до цих пір не вирішена проблема прогнозування та попередження пожеж в природних екосистемах.

Прогнозування параметрів крупних пожеж в природних екосистемах та оцінка їх наслідків за даними супутникового моніторингу екосистем відкриває значні можливості для управління пожежною ситуацією. Проте є ряд труднощів у вирішенні цієї проблеми:

- складний характер і мінливість великих багатоденних лісових пожеж, які розвиваються на великій площі в різноманітних погодних умовах;
- недостатня або неточна інформація про характеристики рослинності, топографії місцевості, локальних метеорологічних показниках;
- недостатня роздільна здатність наявних космічних знімків пожеж;
- не завжди достовірна звітна інформація, що надходить з місць;
- організаційна складність, що полягає в тому, що при боротьбі з пожежами в природних екосистемах поблизу населених пунктів та інших об'єктів економіки виникають проблеми взаємодії протипожежних сил різних відомств: МНС служб охорони лісу, муніципальних і сільських органів самоврядування.

Здавалось, що всю багатовекторну складність виникнення та поширення пожеж в природних екосистемах можливо вирішити за допомогою використання математичного моделювання.

Проблематика, яку покликані вирішувати математичні моделі, багатогранна. Спроби прогнозування виникнення пожеж в природних екосистемах були запропоновані ще в середині минулого XX століття. Найбільш вдалою і визнаною до цих пір є оцінювання пожежної небезпеки за умовами погоди, де застосовують комплексний показник пожежної небезпеки В. Г. Нестерова з деякими удосконаленнями, пов'язаними з урахуванням опадів за минулу добу [12]. Цей показник визначається для поточної доби на основі даних за попередню добу за формулою:

$$ПН_n = k \cdot ПН_{n-1} * t(t-\tau),$$

де: ПН – показник пожежної небезпеки, t – температура (°С), τ – точка роси (°С), визначені о 12 годині дня, k – коефіцієнт, який враховує опади попередньої доби. Подальша модернізація коефіцієнта k здійснюється з урахуванням не лише опадів за минулу добу, але і швидкості вітру.

Показник ПН є простим та зручним для виявлення пожежонебезпечних погодних станів та встановлення класів пожежної небезпеки за умовами погоди. Проте його застосування потребує врахування місцевих кліматичних особливостей. З цією метою для окремих регіонів на основі статистичних даних встановлюють місцеві шкали, які забезпечують точніше прогнозування небезпеки за зростанням комплексного показника. Але комплексний показник не завжди своєчасно може попередити про загрозу пожежі. Він визначається на 12 годину дня, коли вже пожежна небезпека сформована [8].

В 80-90-х роках минулого століття фундаментальні праці Г.О. Доррера та А.М. Гришина, здавалося б, у повній мірі забезпечують математичне моделювання пожеж в природних екосистемах. Проте як показав час, по-перше, створені математичні моделі лише для лісових біогеоценозів, а по-друге, спроби сформувати універсальну математичну модель для впливу природних екосистем продовжуються до цього часу [4, 5].

Пов’язано це з багатьма чинниками, та насамперед, з підтвердженням того, що кожна екосистема являє собою індивідуальне неповторне творіння, на яке накладається вплив абіотичних та біотичних чинників.

Та все ж наукові праці, які опубліковані за останній час в Україні свідчать, що виникнення і поширення вогню у довкіллі хвилюють науковців, які вважають, що вирішення цієї актуальної проблеми лежить в площині математичного моделювання.

Метою представленої публікації є аналіз сучасних математичних моделей запропонованих вітчизняними вченими, що пов’язані з пірогенним чинником в природних екосистемах.

Результати досліджень та їх обговорення

Поняття «пожежа в природних екосистемах» вважається загальновизнаним у вітчизняних виданнях [14]. Проте разом із вживаним словосполученням застосовують ряд інших наукових понять та термінів, серед яких, на наш погляд, найбільш вдалим є поняття «ландшафтної пожежі». Всі пожежі поділяються за їх ландшафтною однорідністю. Під ландшафтно-однорідною пожежею розуміється пожежа, яка розповсюджується по території з одним і тим же типом ландшафту [9].

Під моделлю ландшафтної пожежі розуміють [5] сукупність співвідношень, що

Рис. – Классифікації пожеж за ландшафтною однорідністю [9]

виражають у формалізованому вигляді зв'язок між вхідними і вихідними параметрами цієї динамічної системи.

Як показав аналіз останніх публікацій, пріоритетними для математичного моделювання залишаються лісові пожежі, не дивлячись на те, що в останні роки кількість інших ландшафтно-однорідних пожеж суттєво збільшилась не лише в Україні, а і в цілому в світі. Так, А. М. Гришин поділяє такі моделі на 4 групи: прогнозування швидкості поширення лісової пожежі, прогнозування контура пожежі, прогнозування перебігу і тепломасоперенесення в зоні й по фронту пожежі та загальні математичні моделі, які прогнозують все, що й кожна з попередніх. Він також вводить поняття трьох поколінь загальних математичних моделей **[**4**].** Перше покоління моделей розглядало ліс як пористо-дисперсне середовище, а його основу – як недеформівне тверде тіло. Процеси конвективного та радіаційного теплообміну забезпечували підігрів, піроліз та поширення горіння сусідніми горючими матеріалами. Моделі другого покоління додатково розглядали процеси, які супроводжують лісові пожежі – задимленість, конденсацію вологи та виникнення штучних опадів. Третє покоління моделей враховувало процеси турбулентного тепломасопереносу, наслідком яких є коливання елементів рослин.

Математичні моделі, описані вище, є складними для практичної реалізації через значну кількість різноманітних параметрів, які характеризують лісовий горючий матеріал (ЛГМ), а тому, переважно, мають теоретичне значення [8].

У своїй роботі [8], А. Д. Кузик вважає, що детальний огляд аналітичних моделей, присвячених поширенню лісових пожеж, здійснив Р. Вебер **[**16**]**. Моделі, які присвячені пожежній безпеці лісів, можна поділити на два типи: моделі поширення пожежі та моделі оцінки умов виникнення пожежі.

Основними елементами таких моделей є ЛГМ, полум'я та процеси теплопередачі. Такі моделі поділяються на статистичні, емпіричні та фізичні. Статистичними є моделі, які базуються на залежностях, отриманих виключно на основі досліджень тестових пожеж. За допомогою таких моделей визначають швидкість поширення пожеж. До статистичних моделей належать також моделі, які працюють на принципі клітинних автоматів та перколяції (просочування). Емпіричними є такі моделі, в основі яких покладено принцип накопичення енергії, який не розрізняється серед моделей теплопровідності. До фізичних моделей відносять такі, які використовують процеси теплопровідності. За допомогою таких моделей здійснюються спроби прогнозування швидкості поширення пожежі на основі фізико-математичних засобів.

З точки зору А. Я. Калиновського, теоретичні методи прогнозування процесу ви-

горання при розвитку лісової пожежі можна вельми умовно розділити на два широкі класи: мікроскопічні і феноменологічні [6].

Мікроскопічні моделі вирішують проблему опису лісової пожежі виходячи з рівнянь, що дозволяють враховувати динаміку горіння. При цьому облік в'язкості, турбулентності, теплопровідності і випромінювання, дифузії, конвекції і цілого ряду інших чинників у поєднанні з термодинамічними рівняннями стану приводить до надзвичайно складних диференційних рівнянь. Необхідність завдання певних початкових і граничних умов ще більш ускладнює рішення такої задачі.

Тому велика увага приділяється феноменологічним (експериментально-аналітичним) методам. Саме такому класу моделей присвячені останні наукові роботи вітчизняних науковців. Часто подібні математичні моделі носять прикладний характер.

У цьому підході, спираючись на відомі усереднені емпіричні або теоретичні значення основних параметрів лісових пожеж, розглядають відносно прості моделі, які дозволяють описати розповсюдження кромки пожежі. При цьому, не вдаючись до тонких фізичних деталей процесу розвитку пожежі, бажано враховувати такі основні чинники, як наприклад, напрям і швидкість вітру, вологість, теплотворну здатність і просторовий розподіл горючого матеріалу, топографію ландшафту та інші. Зокрема, широкого поширення набули геометричні моделі опису контура пожежі.

Геометричний підхід припускає вирішення двох взаємозв'язаних завдань. Одна з них полягає в побудові теоретичних моделей динаміки руху кромки пожежі, тобто в прогнозуванні його контура в різні моменти часу. Рішення задачі в таких моделях грунтується на використанні визначеної якимнебудь чином швидкості руху кромки пожежі. Тому іншим завданням є моделювання залежності цієї швидкості від вказаних вище фізичних чинників розвитку пожежі.

Часто представлені математичні моделі базуються на вже відомих методах та системах рівнянь. Так у роботі [11], математична модель низових лісових пожеж розглядається як система рівнянь, що враховує рівняння руху (квазістаціонарна система рівнянь Нав'є-Стокса), баланс маси (рівняння Ейлера) та баланс енергії (температура горіння легкозаймистих матеріалів, концентрація домішок тощо). У науковій роботі [3] наведено модель пожежі на базі ймовірнісно-множинного методу Монте-Карло.

Серед наукових робіт, що мають прикладне значення, варто виділити роботу [1]. У даній монографії описано вплив просторових флуктуацій пірологічних параметрів середовища на інтегральні характеристики низової лісової пожежі та умови її гасіння. Показано, що на характер розвитку низової лісової пожежі впливають не тільки неоднорідності макромасштабу (тобто ті, що порівняні з масштабом всього лісового масиву), але і малі (некартографовані) неоднорідності шару ЛГМ. До важливих висновків з монографії слід віднести:

– отримана стохастична математична модель неоднорідного шару горючого матеріалу, чиї пірологічні характеристики піддаються просторовим флуктуаціям. Шар рослинного горючого матеріалу являє собою векторне випадкове поле, що задається середніми значеннями, дисперсіями і радіусами кореляції. Показано, що поняття неоднорідності шару є відносним. Критерієм у визначенні поняття неоднорідності є масштабний фактор, властивій кромці низової лісової пожежі.

– використовуючи модель неоднорідного шару ЛГМ і модель Ротермела швидкості низової лісової пожежі по однорідному шару ЛГМ, отримана модель швидкості поширення кромки низової лісової пожежі по неоднорідному шару ЛГМ у вигляді стаціонарного нормального випадкового процесу. Показано, що дисперсія швидкості тим вище, чим вище ступінь неоднорідності горючого середовища.

– для спрощення моделі швидкості поширення низової лісової пожежі проведена її апроксимація у вигляді поліноміальної залежності. Водночас це дозволило виявити найбільш значущі параметри, що впливають на швидкість пожежі. Показано, що основними факторами, що визначають швидкість поширення низової лісової пожежі є швидкість вітру, товщина шару, теплоутворююча здатність матеріалу і вологовміст шару ЛГМ.

– отримано математичну модель імовірності самолокалізації низової лісової пожежі, що розвивається в умовах просто-

рово нерівномірно розподілених пірологічних характеристик. Дана модель допускає інтерпретацію у вигляді імовірності локалізації низової лісової пожежі силами пожежогасіння. Показано, що на першій і другій стадіях розвитку пожежі неоднорідність пірологічних характеристик підвищує імовірність локалізації пожежі. На третій стадії спостерігається протилежний ефект, - чим більш неоднорідний є шар ЛГМ, тим пізніше (або з меншою імовірністю) відбудеться гасіння. Справедливість отриманої моделі доведена шляхом граничного переходу до класу детермінованих описів.

– отримано математичні моделі інтегральних характеристик низової лісової пожежі – площі і периметра в умовах вітрового впливу. Показано, що облік флуктуацій пірологічних параметрів шару ЛГМ призводить до збільшення значень даних характеристик у порівнянні з детермінованими моделями, у яких вплив флуктуацій ігнорується. Показано, що з часом зростає зламаність контуру пожежі, що приводить до нелінійного росту периметра. Довжина кромки пожежі, з урахуванням її зламаності, є величиною відносною. Значення її, і, відповідно, обсяг робіт з локалізації пожежі, залежать від тактико-технічних параметрів використовуваних при гасінні технічних засобів.

Заслуговує також уваги прикладне значення наукової праці [13]. У даній роботі запропоновано метод побудови прогнозу розповсюдження пожежі на місцевості, який дозволяє враховувати просторову неоднорідність характеристик паливного матеріалу та наявність перепон для розповсюдження полум'я. Вперше створені алгоритмічне та програмне забезпечення методу, що дозволяють автоматизувати процес побудови прогнозу розповсюдження лісової пожежі у реальному масштабі.

Заслуговують уваги наукові праці, які враховують ландшафтно-екологічні фактори та стан екосистем. Серед наукових робіт, опублікованих в Україні в останні роки, варто відзначити такі роботи як [6], в якій розглянуто модель поширення ландшафтної пожежі з врахування мінливості параметрів вітру і вологості горючого матеріалу на інтегральні характеристики низової пожежі та показано суттєвий вплив на форму і розміри контуру неоднорідного розподілу вологості в ландшафті та швидкість вітру. Подібні цілі переслідуються і у роботі [7]. У ній проведено розрахунки густини теплового потоку від полум'я лісової пожежі для запропонованої реалістичної форми факела з врахуванням його нахилу під дією вітру. Показано, що максимальне значення потоку суттєво залежить від ширини і нахилу факела.

Впливу кліматичних факторів на процеси розвитку і припинення крупних пожеж на відкритій місцевості присвячена робота [10].

У роботі [2] розглядається зв'язок наявності зеленого трав'яного покриву у лісі і частоти виникнення осередків лісової пожежі, показано, що частоту пожеж значною мірою визначає наявність і вологовмісність трав'яного покриву. Обговорюється можливість отримання даних про трав'янистий покрив засобами дистанційного моніторингу.

Модель динаміки контура природної пожежі під дією сумісного впливу ландшафтно-метеорологічних чинників запропоновано О.А. Тарасенком [15]. Ітераційна модель динаміки контуру природної пожежі може бути використана для отримання прогнозу виникнення надзвичайних ситуацій.

Не дивлячись на досягнення вітчизняних науковців у моделюванні пожеж в природних екосистемах, слід зазначити, що на сьогоднішній день відсутні математичні моделі, які б враховували індивідуальні особливості екосистем.

Недостатньо уваги, на наш погляд, приділяється ризику виникнення пожеж в екосистемах різних природних зон.

І врешті, не знайшло відображення у вітчизняній науковій літературі дослідження спрямовані на відновлення і відтворення екосистем після впливу надзвичайних ситуацій, у тому числі ландшафтних пожеж.

Висновок

Таким чином, аналіз сучасних математичних моделей запропонованих вітчизняними вченими, що пов'язані з пірогенним чинником в природних екосистемах, показав, що не дивлячись на фундаментальні узагальнені праці минулого століття щодо математичного моделювання пожеж в природних екосистемах, подібні дослідження продовжуються до цього часу і мають здебільше прикладне значення, що спрямоване

на забезпечення пожежної безпеки лісів і ліквідацію ландшафтних пожеж.

ЛІТЕРАТУРА

1. Абрамов Ю. А. Влияние пространственных флуктуаций пирологических параметров среды на интегральные характеристики низового лесного пожара и условия его тушения / Ю. А. Абрамов, В. Е. Росоха, А. А. Тарасенко. –Х. АГЗ Украины, 2004. – 142 с.
2. Быков В. М. Влияние травяного покрова на природную пожарную опасности в лесу / В. М. Быков, В. А. Комяк, А. Г. Коссе // Проблемы пожарной безопасности .– 2010.– Вы. 27.– С. 39-44
3. Граб М. В. Моделі, методи та алгоритми розповсюдження лісових пожеж / М. В. Граб : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 01.05.02 - математичне моделювання та обчислювальні методи . – Х. : Вид-во ХНУРЕ, 2004. – 21с.
4. Гришин А. М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними / А. М. Гришин. – Новосибирск: Наука, 1992. – 407 с.
5. Доррер Г. А. Математические модели динамики лесных пожаров / Г. А. Доррер. – М.: Лесная пром-сть, 1979. – 160 с.
6. Калиновський А. Я. Влияние изменений параметров ветра и влажности лесного горючего материала на интегральные характеристики низового лесного пожара / А. Я.Калиновський дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 21.06.02. «Пожежна безпека». – Харків : Вид-во УЦЗУ, 2007. – 150с.)
7. Кравців С. Я. Влияние травяного покрова на природную пожарную опасности в лесу / С. Я. Кравців, О. П. Сознік. // Проблемы пожарной безопасности.- 2010.- Выпуск 27.- С. 118-123
8. Кузик А. Д. Математичне моделювання пожежної небезпеки лісів. А. Д. / Кузик. // Науковий вісник НЛТУ України. – 2011. – Вип. 21.16. – С. 104-112
9. Курбатский Н .П. Классификация лесных пожаров. / Н .П. Курбатский. // Вопросы лесоведения. – Красноярск: ИЛД СО АН СССР, 1970. – С. 384 – 407
10. Кустов М. В. Влияние травяного покрова на природную пожарную опасности в лесу / М. В. Кустов, В. Д. Калугин, В.В. Коврегин. // Проблемы пожарной безопасности. - 2011.- Выпуск 29.- С. 102-109
11. Ліщина В. О. Математичне моделювання виникнення та розповсюдження лісових пожеж / В. О. Ліщина : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 01.05.03 – математичне та програмне забезпечення обчислювальних машин і систем. – Київ, 2011. – 22с.
12. Нестеров В. Г. Горимость леса и методы её определения / В. Г. Нестеров. – М. : Гослесбумиздат, 1949. – 76 с.
13. Покровський Р. Л. Раннє виявлення осередків ландшафтних пожеж та прогноз динаміки їх розповсюдження / Р. Л. Покровський автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 21.06.02. «Пожежна безпека». – Х. : Вид-во АПБУ, 2002. – 18с.
14. Про стан техногенної та природної безпеки в Україні 2005-2012 роках : Нац. доповіді [електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.mns.gov.ua/content/national_lecture.html.
15. Тарасенко А. А. Модель динамики контура природного пожара под действием совместного влияния ландшафтно-метеорологических факторов /А. А. Тарасенко. // Проблемы пожарной безопасности .– 2008.- Вып.24.– С. 194-20
16. Weber R.O. Modelling fire spread through fuel beds / R.O. Weber // Prog. Energy Combust. Sci. – 1991. – Vol. 17. – Pp. 67-82.

Надійшла до редколегії 28.10 2012

УДК 551.1

В. О. СОЛОВЬЕВ, канд. г.-м. наук., доц.**, Е. П. ВАРАВИНА**
Национальный технический университет «ХПИ»

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ГЕОЛОГИЯ: ЕЕ СТРУКТУРА И ЗАДАЧИ

Рассмотрена суть и структура экологической геологии, которая является новым, активно формирующимся научным направлением. Подчеркивается, что некоторые составные ее части (палеоэкология, геоэтика и др.), обычно, в ее составе не указываются. Формулируются основные задачи науки, в числе которых должен быть прогноз природных катастроф.

Ключевые слова: Геоэкология, экогеология, геологическая среда, охрана природы

Соловйов В. О., Варавіна О. П. ЕКОЛОГІЧНА ГЕОЛОГІЯ: ЇЇ СТРУКТУРА Й ЗАДАЧІ.
Розглянута суть й структура екологічної геології, яка є активно формуючимся науковим напрямком. Підкреслюється, що деякі складові її частини (палеоекологія, геоетика та ін..), звичайно в її складі не вказані. Формулюються основні задачі науки, в складі яких повинен бути прогноз природних катастроф.

Ключові слова: Геоекологія, екогеологія, геологічне середовище, охорона природи

© Соловьев В. О,, Варавина Е. П., 2012