



## ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ РОЗВИТКУ ПРИРОДНИХ КАТАСТРОФ

УДК 004.67

DOI: <https://doi.org/10.35546/2313-0687.2020.27.108-116>

**Пальона Вікторія Юріївна,**

аспірант кафедри програмних засобів і технологій,  
Херсонський національний технічний університет, Херсон, Україна,  
**E-mail:** palenaya.v.wezom@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7857-2680

**Кирийчук Дмитро Леонідович,**

кандидат технічних наук, доцент кафедри програмних засобів і технологій,  
Херсонський національний технічний університет, Херсон, Україна,  
**E-mail:** kidiam2@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4905-6932

**Анотація.** На території України можливе виникнення практично всього спектру небезпечних природних явищ і процесів геологічного, гідрогеологічного, метеорологічного, а також медико-біологічного походження, які є джерелами природних катастроф – масштабних ендегенних і екзогенних процесів, що призводять до людських жертв, великого екологічного і економічного збитків.

Тому актуальною науково-прикладною задачею є дослідження вже існуючих та розробка нових математичних моделей розвитку природних катастроф.

В роботі проведено дослідження математичних моделей розвитку природних катастроф геологічного, медико-біологічного походження та математичних моделей розвитку пожеж в природних екологічних системах.

Встановлено, що класичною моделлю поширення медико-біологічних катастроф є модель SIR. В моделі розглядається три групи індивідів: сприйнятливі до захворювання (Susceptible), інфіковані (Infected) і ті, що вже перехворіли (Recovered). Математично така модель задається системою диференціальних (безперервний час) або різницевих (дискретний час) рівнянь. Ці рівняння описують закон зміни чисельності груп індивідів протягом певного часу. В роботі розглянуто також моделі, що є похідними від SIR. Подано інформацію про найбільш розповсюджені з них.

Проведено дослідження математичних моделей, які дозволяють моделювати селеві, зсувні, обвальні процеси, гірські паводки з різним ступенем достовірності. Наведено опис основних типів моделей селевих і схилових процесів.

Проведено аналіз робіт, присвячених методикам прогнозу виникнення і поширення природних пожеж та його особливостям.

**Ключові слова:** математичне моделювання, медико-біологічна катастрофа, пожежі в природних екологічних системах.

**Постановка проблеми.** В останні десятиліття в Україні намітилася стійка тенденція зростання числа природних катастроф.

Джерелами природних катастроф є небезпечні природні явища, результатом впливу яких є зниження рівнів економічного, соціального та екологічного потенціалів країни.

Комплексний фізико-географічний аналіз небезпечних природних явищ на території України дозволив виділити понад 30 їх видів, які в залежності від механізму і природи походження, а також регулярності проявів можна класифікувати наступним чином [1]:

- геологічні небезпечні природні явища (зсуви, обвали, лавини, селі, абразія, ерозія, пилові бурі);
- гідрологічні небезпечні природні явища (повені, дощові паводки, підвищення рівня ґрунтових вод (підтоплення);
- метеорологічні небезпечні природні явища (бурі, урагани, смерчі (торнадо), шквали, град, зливи, снігопади, ожеледь, морози, хуртовини, тумани, посухи, сильна спека, суховій, заморозки);
- пожежі в природних екологічних системах (лісові і степові пожежі, пожежі на сільськогосподарських угіддях, торф'яні пожежі);
- медико-біологічні небезпечні природні явища, пов'язані з масовими інфекційними захворюваннями населення, тварин, ураженнями сільськогосподарських рослин хворобами та шкідниками.

На території України можливе виникнення практично всього спектру небезпечних природних явищ і процесів геологічного, гідрогеологічного, метеорологічного, а також медико-біологічного походження, які є джерелами природних катастроф – масштабних ендегенних і екзогенних процесів, що призводять до людських жертв, великого екологічного і економічного збитків.

Тому актуальною науково-прикладною задачею є дослідження вже існуючих та розробка нових математичних моделей розвитку природних катастроф.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В роботі [2] розглянуто визначення і загальні закономірності катастроф. Встановлено, що для їх прогнозу і математичного моделювання доцільно використовувати детерміновано-ймовірнісні моделі. Визначено вплив сполученого тепло – і масообміну на виникнення і розвиток деяких природних і техногенних катастроф

та запропоновано здійснювати еколого-математичний моніторинг потенційно небезпечних об'єктів.

В роботі [3] розглянуто завдання моніторингу і прогнозування природних катастроф. Особливу увагу приділено синтезу систем моніторингу навколишнього середовища, що забезпечують збір, зберігання і обробку необхідної інформації для розв'язку цих завдань. Розвинена нова концепція синтезу систем аерокосмічного моніторингу, що заснована на алгоритмах і методах екоінформатики і має за мету спільне використання інформаційних технологій і моделей еволюції підсистем навколишнього середовища. Праведно аналіз конкретних ситуацій виникнення природних катастроф.

В роботі [4] розглянуто новий теоретико-експериментальний підхід до оцінки ймовірності виникнення природних пожеж з використанням як детермінованих методів механіки суцільних багатофазних середовищ, так і методів теорії ймовірностей і математичної статистики. Наведено результати проведення експериментальних досліджень кінетики сушіння горючих матеріалів, а також особливостей виникнення і поширення природних пожеж.

В роботі [5] здійснено аналіз існуючих математичних моделей за впливом пожеж на природні комплекси. Запропоновано регресійну модель, яка враховує вплив сукупності пірогенних факторів, що впливають на відновлення компонентів природних комплексів після надзвичайних ситуацій, що виникли внаслідок природних пожеж.

В роботі [6] проведено якісну оцінку ролі математичного моделювання в прогнозуванні наслідків лісових пожеж. Визначено конкретні ролі математичних моделей фізичних процесів, що беруть участь у виникненні наслідків пожеж, в створенні інструментарію для прийняття рішень, що допомагає керівникам приймати більш обґрунтовані рішення при плануванні заходів по боротьбі з лісовими пожежами.

При оцінці потенційної корисності математичних моделей в цих ролях введено нову таксономію ефектів лісових пожеж, що заснована на довголітті ефекту, тимчасової затримки між вогнем і появою ефекту і відстанню між вогнем і ефектом. Фізичні процеси також використано для математичного моделювання, в якості факторів, що ускладнюють реалізацію або використання моделей. В роботі авторами визначено такі способи моделювання: теплопередача в умовах пожеж та

поблизу них; процеси і продукти спалювання; хімічна і фізична реакція ґрунтів, що підігріваються полум'ям; ерозія і гідрологія районів, постраждалих від пожеж; рідинна механіка вітру і вогню; перенесення і розсіювання вогневих викидів в атмосфері; глобальний вплив на атмосферу.

В роботі [7] побудовано модифіковану SIRS-модель розповсюдження епідемій у вигляді решітки стохастичних клітинних автоматів. У моделі використано динамічне регулювання чисельності населення з обмеженням максимального числа індивідів популяції і впливом захворювання на процеси відтворення. Виявлено, що в залежності від керуючих параметрів модель демонструє чотири різних сталих режиму: вимирання популяції, стаціонарний перебіг захворювання, повне вилікування популяції, самопідтримні коливання числа інфікованих, що супроводжуються коливаннями загальної чисельності популяції. Останній режим проявляється поблизу кордону зони повного вилікування і характеризується нерегулярними коливаннями кількості хворих з вираженою пері-

одичної складової. Показано, що при періодичній зміні параметрів модель демонструє зашумлені періодичні або квазіперіодичні коливання

**Мета дослідження.** Метою є дослідження математичних моделей розвитку природних катастроф.

**Виклад матеріалу дослідження.** Класичною моделлю поширення медико-біологічних катастроф є модель SIR [7, 8–11].

В моделі розглядається три групи індивідів: сприйнятливі до захворювання (Susceptible), інфіковані (Infected) і ті, що вже перехворіли (Recovered).

Передача інфекції здійснюється від інфікованих індивідів до сприйнятливих. Ті індивіди, що вже перехворіли набувають імунітету і не можуть бути заражені вдруге.

Математично такі моделі задаються системами диференціальних (безперервний час) або різницевих (дискретний час) рівнянь. Ці рівняння описують закон зміни чисельності груп індивідів протягом певного часу.

Нині існує багато моделей, що є похідними від SIR. На рис. 1 подано інформацію про найбільш розповсюджені з них [8].

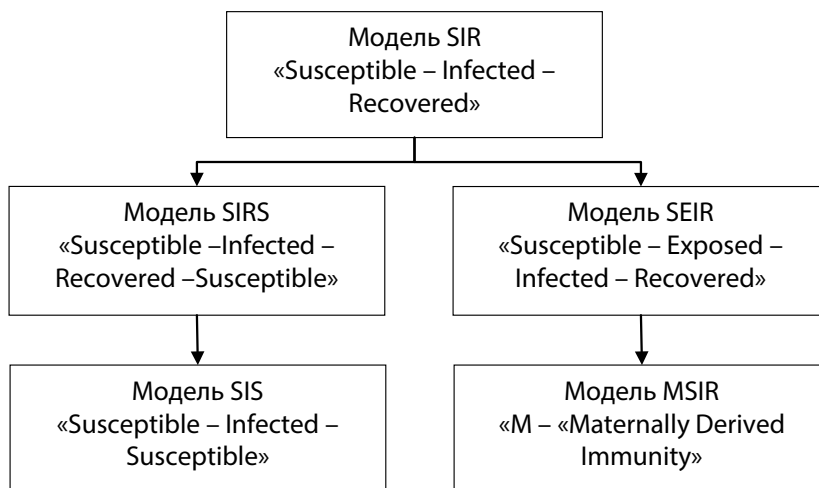


Рис. 1 – Моделі поширення медико-біологічних катастроф

Модель SIRS – «Сприйнятливі – Інфіковані – Ті, що видужали – Сприйнятливі». Модель, що описує динаміку захворювань з тимчасовим імунітетом (Ті індивіди, що видужали з часом знову стають сприйнятливими).

Модель SEIR – «Сприйнятливі – Контактні – Інфіковані – Ті, що видужали». Модель, що описує поширення захворювань з інкубаційним періодом.

Модель SIS – «Сприйнятливі – Інфіковані – Сприйнятливі». Модель, що описує поширення захворювання, до якого не виробляється імунітет.

Модель MSEIR – «Наділені імунітетом від народження – Сприйнятливі – Контактні – Інфіковані – Ті, що видужали». Модель, що враховує імунітет дітей, набутий внутрішньоутробно.

Застосування моделі SIR дозволяє точно моделювати епідемії грипу та інших захворювань у великих містах.

Модель SIR описується системою диференціальних рівнянь 1-6 [8-11].

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{\beta IS}{N}, \quad (1)$$

де  $S(t)$  – чисельність сприйнятливих індивідів в момент часу  $t$ ;

$I(t)$  – чисельність інфікованих індивідів в момент часу  $t$ ;

$R(t)$  – чисельність індивідів, що вже перехворіли в момент часу  $t$ ;

$\beta$  – коефіцієнт інтенсивності контактів індивідів з подальшим інфікуванням;

$\gamma$  – коефіцієнт інтенсивності одужання інфікованих індивідів.

$$\frac{dI}{dt} = \frac{\beta IS}{N} - \gamma I, \quad (2)$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma I, \quad (3)$$

$$S(0) = S_0, I(0) = I_0, R(0) = R_0. \quad (4)$$

Чисельність популяції в моделі SIR вважається постійною:

$$\frac{dS}{dt} + \frac{dI}{dt} + \frac{dR}{dt} = 0. \quad (5)$$

Таким чином:

$$S(t) + I(t) + R(t) = Constant = N, \quad (6)$$

де  $N$  – чисельність населення, яка вважається сталою.

В моделі SIR динаміка інфекційного захворювання залежить від наступного співвідношення:

$$R_0 = \frac{\beta}{\gamma} \quad (7)$$

де  $R_0$  – коефіцієнт поширення інфекції.

Співвідношення (7) показує число нових випадків поширення інфекції, де всі особи є сприйнятливими до захворювання.

Слід зазначити, що в моделі SIR не враховуються демографічні процеси, такі як народжуваність, смертність та міграція індивідів. Це спрощення є коректним в силу того, що епідемія передбачається швидкоплинною в порівнянні з часом життя індивідів [8].

Нині створено велику кількість математичних моделей, які дозволяють моделювати селеві, зсувні, обвальні процеси, гірські паводки з різним ступенем достовірності.

В роботах [12-14] було виділено три основних типи моделей селевих і схлизових процесів – безперервні моделі, клітинні автомати і дискретні моделі.

Безперервні моделі представляють рух потоку речовини як загального середовища та застосовуються переважно для моделювання селевих і схлизових процесів. В основі безперервних моделей лежить рівняння безперервності, а також рівняння руху в'язкої рідини Нав'є-Стокса в явному вигляді або в інтегрованій по глибині гідравлічній формі – рівняння руху Сен-Венана.

Клітинні автомати представляють рух потоку речовини як закономірну зміну станів просторових осередків в напрямку руху потоку. Клітинні автомати застосовуються переважно для моделювання селів і зсувів. В основі клітинних автоматів лежить правило, що визначає перехід осередку з одного стану в інший. Одночасно для кожної конкретної комірки простору визначається її стан на кожному наступному часовому кроці з урахуванням стану даного осередку і сусідніх з нею осередків на попередньому часовому кроці.

Дискретні моделі представляють рух потоку речовини у вигляді руху сукупності окремих структурних частинок і застосовуються переважно для моделювання обвалів і зсувів. В основі дискретних моделей лежить рівняння руху структурних частинок – матеріальних точок або твердих тіл, що отримується безпосередньо з другого закону Ньютона. Одночасно для кожної обраної структурної частки речовини визначаються її динамічні параметри (поточні координати, вектор швидкості) на кожному наступному часовому кроці з урахуванням параметрів даної частинки і тих частинок, що контактують з нею на попередньому часовому кроці.

Математичне моделювання розвитку пожеж в природних екологічних системах є однією з найскладніших областей моделювання в силу різноманіття і складності фізичних процесів, що протікають в зоні пожежі [15]. Однак цій тематиці присвячено значну кількість робіт.

Так, в роботі [16] автором запропоновано модель, яка виходить з припущення, що швидкість поширення полум'я пропорційна відношенню енергії, що виділяється при згорянні, до енергії, що потрібна для нагрівання нових порцій пального до температури

займання. Модель Ротермела не використовує будь-яких нових теоретичних положень про процес горіння, вона базується на узагальненні великого експериментального матеріалу і пройшла ряд перевірок в польових умовах. У моделі в якості вхідних використовуються тільки ті характеристики пального, які можуть бути вимірні заздалегідь.

Модель Ротермела викликала появу багатьох робіт по її розвитку, доповненню, алгоритмізації і була

включена в Національну систему визначення пожежної небезпеки США. Незважаючи на окремі критичні зауваження, її слід визнати однією з найбільш вдалих зарубіжних експериментально-аналітичних моделей, призначених для розрахунку швидкості поширення вогню по лісовим горючих матеріалів при низових пожежах.

Концептуальну схему моделі Ротермела для швидкості поширення вогню подано на рис. 2.

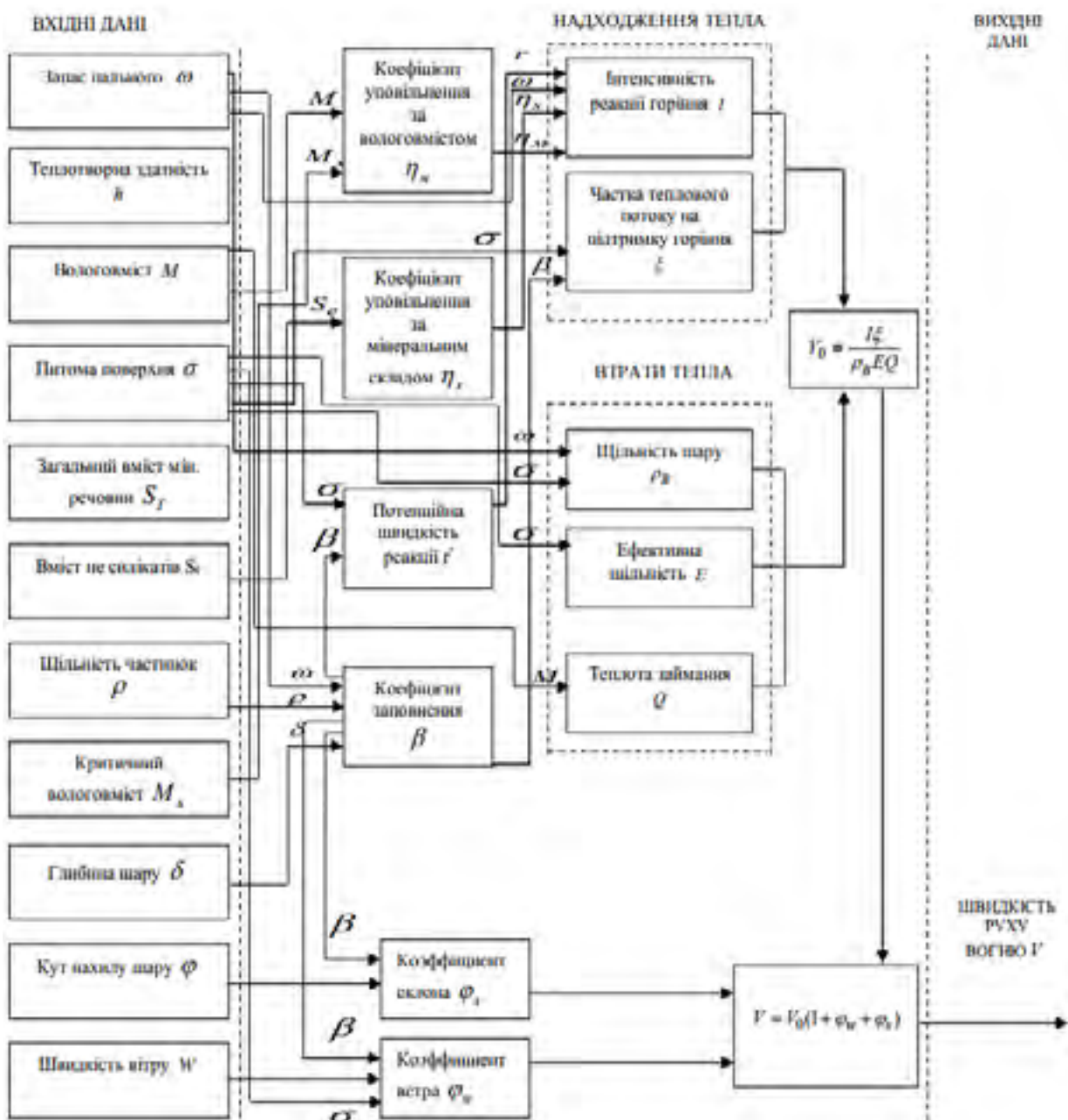


Рис. 2 – Концептуальна схема моделі Ротермела для швидкості поширення вогню

В роботі [15] авторами запропоновано модифіковану двовимірну модель лісових пожеж. Модель побудовано шляхом осереднення вихідних тривимірних рівнянь двофазного середовища по висоті шару лісових горючих матеріалів. Для опису турбулентності в роботі використовується  $k$ -модель з введенням додаткових членів генерації і дисипації турбулентної кінетичної енергії в лісовому масиві. Швидкість турбулентного горіння в газовій фазі описується моделлю дроблення вихорів, згідно з якою швидкість горіння при високій температурі не залежить від кінетики реакцій, а визначається виключно швидкістю турбулентного змішування компонент. Наведені результати демонстраційних розрахунків показують, що запропонована модель дає якісно правильну картину поширення фронту пожежі в умовах неоднорідного розподілу запасів лісових горючих матеріалів, наявності перешкод для поширення вогню і впливу вітру.

Модель може бути використана для прогнозування поширення фронту пожежі в реальному часі, для отримання експертних оцінок розвитку надзвичайних ситуацій, пов'язаних з лісовими пожежами, і оцінки збитку від пожеж.

В роботі [17] авторами розглянуто можливість використання паралельних обчислювальних систем і космічних знімків для моделювання динаміки лісових пожеж. Запропоновано спосіб оцінки характеристик динаміки пожежі за космічними знімками. Проаналізовано різні способи декомпозиції ґратчастої області при чисельному моделюванні динаміки розповсюдження лісової пожежі.

У результаті дослідження авторами були створені такі програми: програма, що вирішує зворотну задачу –

отримання значень швидкостей на основі аерокосмічних знімків контурів пожежі в послідовні моменти часу; програма для препроцесорної обробки даних – «розрізання» даних на окремі файли для багатопроцесорних обчислень; програма для чисельного моделювання поширення кромки лісової пожежі.

В роботі [18] представлені результати експериментально-аналітичного дослідження процесів виникнення і розповсюдження лісової низової пожежі. Виявлено значення температури факела полум'я при горінні покриву соснового лісу, визначено рівень прогріву лісового горючого матеріалу при впливі теплового випромінювання. Здійснено розрахунок щільності променистого теплового потоку від фронту полум'я циліндричної форми з подальшим прогнозом реалізованих в умовах лісової пожежі рівнів теплового впливу.

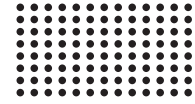
**Висновки.** Розглянуто класичну модель поширення медико-біологічних катастроф -SIR. Встановлено, що математично така модель задається системою диференціальних (безперервний час) або різницевих (дискретний час) рівнянь. В роботі розглянуто також моделі, що є похідними від SIR. Подано інформацію про найбільш розповсюджені з них.

Проведено дослідження математичних моделей, які дозволяють моделювати селєві, зсувні, обвальні процеси, гірські паводки з різним ступенем достовірності. Наведено опис основних типів моделей селєвих і схилових процесів.

Проведено аналіз робіт, присвячених методикам прогнозу виникнення і поширення природних пожеж та його особливостям.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Liashenko, O., Kyryichuk, D., & Lozhkin, R. (2019). Development of a decision support system for mitigation and elimination the consequences of natural disasters in Ukraine. In International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM (Vol. 19, pp. 825–832). International Multidisciplinary Scientific Geoconference. <https://doi.org/10.5593/sgem2019/2.1/s08.107>
2. Гришин А.М. Моделирование и прогноз некоторых природных и техногенных катастроф. Труды Международной конференции RDAMM–2001. 2001. Т. 6, Ч. 2, Спец.выпуск. С. 134–139.
3. Бондур В.Г., Крапивин В.Ф., Потапов И.И., Солдатов В.Ю. Природные катастрофы и окружающая среда. Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 2012. № 1. С. 3–150.
4. Фильков А.И. Физико-математическое моделирование возникновения природных пожаров. – Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2014. 276 с.
5. Буц Ю.В. Математическое моделирование восстанавливаемости природных комплексов после воздействия пирогенного фактора. Географические науки. 2013. № 8(15). Ч. 2. С. 116–118.
6. Albini, F.A., Brown, J.K. Mathematical modeling and predicting wildland fire effects. Combust Explos Shock Waves 32, 1996. P. 520–533. <https://doi.org/10.1007/BF01998574>
7. Шабунин А.В. SIR-модель распространения инфекций с динамическим регулированием численности популяции: Исследование методом вероятностных клеточных автоматов. Известия вузов. ПНД. 2019. том 27. выпуск 2. С. 5–20. DOI: <https://doi.org/10.18500/0869-6632-2019-27-2-5-20>



8. Леоненко В.Н. Математическая эпидемиология. Учебно-методическое пособие. СПб. : Университет ИТМО. 2018. 38 с.
9. Kermack W., McKendrick A. Contributions to the mathematical theory of epidemics – I. *Bulletin of Mathematical Biology*. 1991. 53 (1–2). P. 33–55. doi:10.1007/BF02464423.
10. Kermack W., McKendrick A. Contributions to the mathematical theory of epidemics – II. The problem of endemicity. *Bulletin of Mathematical Biology*. 1991. 53 (1–2): P. 57–87. doi:10.1007/BF02464424.
11. Kermack W., McKendrick A. Contributions to the mathematical theory of epidemics – III. Further studies of the problem of endemicity. *Bulletin of Mathematical Biology*. 1991. 53 (1–2). P. 89–118. doi:10.1007/BF02464425.
12. Михайлов В.О., Черноморец С.С. Математическое моделирование селей, обвалов и оползней. 2011. 131 с.
13. Трофимов А.М., Московкин В.М. Математическое моделирование в геоморфологии склонов. Казань : Изд-во Казан. ун-та, 1983. 218 с.
14. Михайлов В.О. Математическое моделирование селей и ледниковых катастроф. Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2010». / Отв. ред. Алешковский И.А., Костылев П.Н., Андреев А.И., Андриянов А.В. М. : МАКС Пресс, 2010.
15. Кулешов А.А., Мышецкая Е.Е., Якуш С.Е. Моделирование распространения лесных пожаров на основе модифицированной двумерной модели. *Матем. Моделирование*. 2016. Том 28. № 12. С. 20–32.
16. Rothermel R.C. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. Ogden: USDA, Forest Service Research Paper. Int115. InterMountain forest and range experiment Station, 1972. 40 p.
17. Вдовенко М.С., Доррер Г.А. Моделирование лесных пожаров с использованием кластерных вычислительных систем. *Хвойные бореальной зоны*. XXVI. № 2. 2009. С. 239–243.
18. Ласута Г.Ф., Гоман П.Н. Моделирование процессов возникновения и распространения лесного низового пожара с оценкой уровня тепловой нагрузки от фронта пламени. *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси*. Т. 3. № 2. 2019. С. 138–154.

## RESEARCH OF MATHEMATICAL MODELS FOR THE DEVELOPMENT OF NATURAL DISASTERS

**Viktorii Palona,**

PhD Student of the Department of Software and Technologies,  
Kherson National Technical University, Kherson, Ukraine,  
e-mail: palenaya.v.wezom@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7857-2680

**Dmytro Kiriychuk,**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Software and Technologies,  
Kherson National Technical University, Kherson, Ukraine,  
e-mail: kidiam2@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4905-6932

**Abstract.** Almost the entire spectrum of natural hazards and processes of geological, hydrogeological, meteorological, as well as biomedical origin, which are sources of natural disasters may arise in the territory of Ukraine – large-scale endogenous and exogenous processes leading to human casualties, large ecological and damage.

Under these conditions, the actual scientific and applied task is to investigate existing and develop new mathematical models of the development of natural disasters.

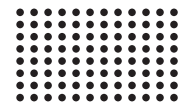
The paper investigated mathematical models of the development of natural disasters of geological, medico-biological origin and mathematical models of fire development in natural ecological systems.

The SIR model has been identified as a classic model for the spread of biomedical disasters. The model considers three groups of individuals: susceptible (Susceptible), infected (Infected), and already sick (Recovered). Mathematically, such a model is given by a system of differential (continuous time) or difference (discrete time) equations. These equations describe the law of the number of groups of individuals changing over time. The paper also considered models that are derived from SIR. Information is provided on the most common of these.

The study of mathematical models allowing to model mud, landslide and mountain floods with varying degrees of confidence has been carried out. The main types of sediment and slope models are described.

The analysis of works on methods of forecasting of occurrence and spread of natural fires and their peculiarities is made.

**Keywords:** *mathematical modelling, biomedical disaster, fires in natural ecological systems.*



## ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РАЗВИТИЯ ПРИРОДНЫХ КАТАСТРОФ

**Паленая Виктория Юрьевна,**

аспирант кафедры программных средств и технологий,  
Херсонский национальный технический университет, Херсон, Украина,  
e-mail: palenaya.v.wezom@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7857-2680

**Кирийчук Дмитрий Леонидович,**

кандидат технических наук, доцент кафедры программных средств и технологий,  
Херсонский национальный технический университет, Херсон, Украина,  
e-mail: kidiam2@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4905-6932

**Аннотация.** На территории Украины возможно возникновение практически всего спектра опасных природных явлений и процессов геологического, гидрогеологического, метеорологического, а также медико-биологического происхождения, которые являются источниками природных катастроф – масштабных эндогенных и экзогенных процессов, приводящих к человеческим жертвам, большого экологического и экономического ущерба.

Поэтому актуальной научно-прикладной задачей является исследование существующих и разработка новых математических моделей развития природных катастроф.

В работе проведено исследование математических моделей развития природных катастроф геологического, медико-биологического происхождения и математических моделей развития пожаров в природных экологических системах.

Установлено, что классической моделью распространения медико-биологических катастроф является модель SIR. В модели рассматривается три группы индивидов: восприимчивые к заболеванию (Susceptible), инфицированные (Infected) и те, что уже переболели (Recovered). Математически такая модель задается системой дифференциальных (непрерывное время) или разностных (дискретное время) уравнений. Эти уравнения описывают закон изменения численности групп индивидов в течение определенного времени. В работе рассмотрены также модели, которые являются производными от SIR. Представлена информация о наиболее распространенных из них.

Проведено исследование математических моделей, позволяющих моделировать селевые, оползневые процессы, горные паводки с разной степенью достоверности. Приведено описание основных типов моделей селевых и склоновых процессов.

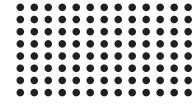
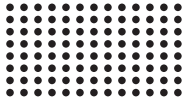
Проведен анализ работ, посвященных методикам прогноза возникновения и распространения природных пожаров и их особенностям.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, медико-биологическая катастрофа, пожары в природных экологических системах.

### REFERENCES:

1. Liashenko, O., Kyrychuk, D., Krugla, N., & Lozhkin, R. (2019). Development of a decision support system for mitigation and elimination the consequences of natural disasters in Ukraine. In International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM (Vol. 19, pp. 825–832). International Multidisciplinary Scientific Geoconference. <https://doi.org/10.5593/sgem2019/2.1/s08.107>
2. Hryshyn A. M. (2001). Modeling and forecasting some natural and man-general disasters RDAMM–2001. Vol.6, P2, Special edition. 134–139.
3. Bondur V.H., Krapuyun V.F., Potapov Y.Y., Soldatov V.Iu. (2012). Natural disasters and the environment. Environmental and natural resource issues. №1. 3–150.
4. Fylkov A.Y. (2014). Physical and mathematical modeling of the occurrence of natural fires. Tomsk: Publishing House of Tomsk State University, 276.
5. Buts Yu.V. (2013). Mathematical modeling of the recoverability of natural complexes after exposure to the pyrogenic factor. Geographical sciences. №8(15). Vol. 2. 116–118.
6. Albin, F.A., Brown, J.K. (1996). Mathematical modeling and predicting wildland fire effects. Combust Explos Shock Waves 32, 520–533. <<https://doi.org/10.1007/BF01998574>>





7. Shabunyn A.V. (2019). SIRS-model of the spread of infections with dynamic regulation of the population size: Investigation by the method of probabilistic cellular automata. Proceedings of universities. PND. Vol 27. Issue 2. 5–20. DOI: <https://doi.org/10.18500/0869-6632-2019-27-2-5-20>
8. Leonenko V.N. (2018). Mathematical epidemiology. Study guide. SPb: ITMO University. 38.
9. Kermack W., McKendrick A. (1991). Contributions to the mathematical theory of epidemics – I. Bulletin of Mathematical Biology. 53 (1–2). 33–55. doi:10.1007/BF02464423.
10. Kermack W., McKendrick A. (1991). Contributions to the mathematical theory of epidemics – II. The problem of endemicity. Bulletin of Mathematical Biology. 53 (1–2): 57–87. doi: 10.1007/BF02464424.
11. Kermack W., McKendrick A. (1991). Contributions to the mathematical theory of epidemics – III. Further studies of the problem of endemicity. Bulletin of Mathematical Biology. 53 (1–2). 89–118. doi:10.1007/BF02464425.
12. Mykhailov V.O., Chernomorets S.S. (2011). Mathematical modeling of mudflows, avalanches and landslides. 131.
13. Trofymov A.M., Moskovkyn V.M. (1983). Mathematical modeling in slope geomorphology. Kazan: Kazan Publishing House University, 218.
14. Mykhailov V.O. (2010). Mathematical modeling of mudflows and glacial disasters. Materials of the International Youth Scientific Forum "LOMONOSOV-2010». M. : MAKS Publising.
15. Kuleshov A.A., Myshetskaia E.E., Yakush S.E. (2016). Simulation of the spread of forest fires based on a modified two-dimensional model. Mat. Modeling. Vol/28. № 12. 20–32.
16. Rothermel R.C. (1972). A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. Ogden: USDA, Forest Service Research Paper. Int115. InterMountain forest and range experiment Station, 40.
17. Vdovenko M.S., Dorrer H.A. (2009). Simulation of forest fires using cluster computing systems. Conifers of the boreal zone. XXVI. № 2. 239–243.
18. Lasuta H.F., Homan P.N. (2019). Modeling the processes of occurrence and propagation of a forest ground fire with an assessment of the level of heat load from the flame front. Bulletin of the University of Civil Protection of the Ministry of Emergencies of Belarus. Vol. 3. № 2. 138–154.