

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ЭКОСИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ ПРИРОДНОГО ХАРАКТЕРА

Жарикова М. В.

1. Введение

Проблема изучения и прогнозирования чрезвычайных ситуаций природного характера (ЧСПХ) приобрела в настоящее время первостепенное значение. Это связано с повышением их интенсивности и частоты в результате роста численности населения и промышленного производства, массовой урбанизации, деградации природной среды, глобального потепления и т. д. Вовлечение все новых территорий в хозяйственное освоение, наличие значительного числа производственных объектов, которые могут стать источниками природных катастроф, приводит к возникновению ЧСПХ, сопровождающихся ущербом хозяйству, а нередко – и человеческими жертвами. В последние десятилетия в мире отмечается рост не только числа, масштабов и интенсивности ЧСПХ, но и осязаемое возрастание величины и тяжести наносимого ими ущерба. Это отвлекает огромные финансовые средства на устранение их последствий и отрицательно сказывается на социально-экономическом развитии общества.

В связи с вышеизложенным, проблема защиты населения и территорий от ЧСПХ становится все более актуальной. Осуществление комплекса превентивных мероприятий по прогнозированию и предупреждению ЧСПХ, обеспечивающих защиту населения и территории, базируется в первую очередь на достоверной оценке их влияния на экосистемы. Проведение таких мероприятий позволяет выработать комплекс защитных мер и определить объемы резервов для обеспечения социально приемлемого уровня природного риска.

2. Объект исследования и его технологический аудит

В данной работе ЧСПХ рассматривается как составная часть экосистемы (ЭС) – целостного территориального образования, формирующегося в тесном взаимодействии природных и искусственных объектов. ЭС представляют собой класс систем, обладающих следующими отличительными особенностями:

- 1) имеют пространственную привязку;
- 2) объединяют в себе модель территории, природных и искусственных объектов;
- 3) имеют послойную структуру: первый слой представляет собой территориальную систему (ТС) – модель местности, второй слой представляет собой модель ЧСПХ.

ЧСПХ представляют собой класс процессов разрушительного характера, наносящих ущерб ТС и обладающих следующими отличительными особенностями:

- 1) развиваются в пространстве и времени;
- 2) возникают чаще всего внезапно, в результате чего сложны в предупреждении;
- 3) протекают в условиях неопределенности;
- 4) наносят ущерб элементам ЭС;
- 5) развиваются в условиях дефицита времени и ресурсов.

Для указанного класса процессов актуальными являются задачи поддержки принятия решений (ППР), для решения которых необходимо прогнозировать влияние ЧСПХ на ЭС. Для указанных классов систем и процессов в настоящее время не существует научно-обоснованных методов поддержки принятия решений.

3. Цель и задачи исследования

Цель исследования – построить приближенную пространственную модель ЭС в условиях ЧСПХ, пригодную для решения задач ППР по противодействию ЧСПХ с использованием методов теории топологии, а также нечетких множеств.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Построить статическую модель ЭС в виде топологического пространства, порожденного отношением неразличимости.
2. Разработать динамическую модель ЭС в условиях ЧСПХ в виде нечеткого динамического топологического пространства.

4. Анализ литературных данных

В настоящее время большое внимание уделяется моделированию ЧСПХ.

В работах [1–4] эта задача решается с применением методов статистического анализа для ретроспективных баз данных. Однако неполная наблюдаемость событий, связанных с возникновением ЧСПХ, и недостаточная точность измерения параметров внешней среды препятствуют получению достоверных прогнозов, что снижает ценность самостоятельного применения статистических подходов.

В работах [5–8] используются детальные математические модели физико-химических процессов, происходящих при ЧСПХ при определенном состоянии внешней среды на однородных участках местности, что позволяет достаточно точно определять границы контура ЧСПХ в заданные моменты времени. Недостатком использования таких моделей является их высокая вычислительная сложность.

В [9] модель ЧСПХ в значительной мере упрощается, что позволяет ускорить вычисления, но снижает их точность, вследствие чего снижается и убедительность оценки ситуации.

По результатам анализа литературных источников можно сделать вывод о том, что требуемое для лица, принимающего решение (ЛПР), быстрое действие СППР может быть достигнуто с помощью построения адекватной пространственной модели территории в условиях ЧСПХ. Неполнота и неточность измерения различных характеристик событий, свойственные ЧСПХ,

позволяют существенно смягчить требования по точности представления исходной информации. Следовательно, требуемое быстродействие СППР может быть достигнуто с помощью некоторого огрубления (размывания) пространственной модели, что позволит значительно снизить требования к модели ЧСПХ по точности [10, 11].

Таким образом, несмотря на активные исследования, применение устоявшихся подходов для рассматриваемого класса процессов, к которому принадлежат ЧСПХ, не обеспечивает требуемого быстродействия и приемлемой эффективности СППР. Это обуславливает актуальность данных исследований.

Для моделирования ЭС в условиях ЧСПХ, представляющей пространственную модель в СППР, будем использовать топологические пространства, а для ее размывания могут быть использованы методы теорий нечетких множеств [12].

5. Материалы и методы исследований

Модель местности, или территории, в пределах которой развивается ЧСПХ, представляет собой территориальную систему (ТС) Ξ . Модель ТС представлена в виде подпространства X двумерного Евклидова пространства с заданной на нем нормой, метрикой и наложенной сеткой из равновеликих квадратных ячеек C [10, 11].

Каждая точка пространства X обладает набором атрибутов:

$$A = A_S \cup A_D,$$

где A_S – набор статических атрибутов (описывающих характеристики местности); A_D – набор динамических атрибутов (изменяющихся в условиях охвата точки ЧСПХ).

В отдельное множество выделим совокупность параметров окружающей среды (ОС) A_E , таких как скорость и направление ветра, влажность воздуха, температура воздуха (рис. 1). Отличительной особенностью этих атрибутов является то, что их значения не привязаны к определенной точке пространства.

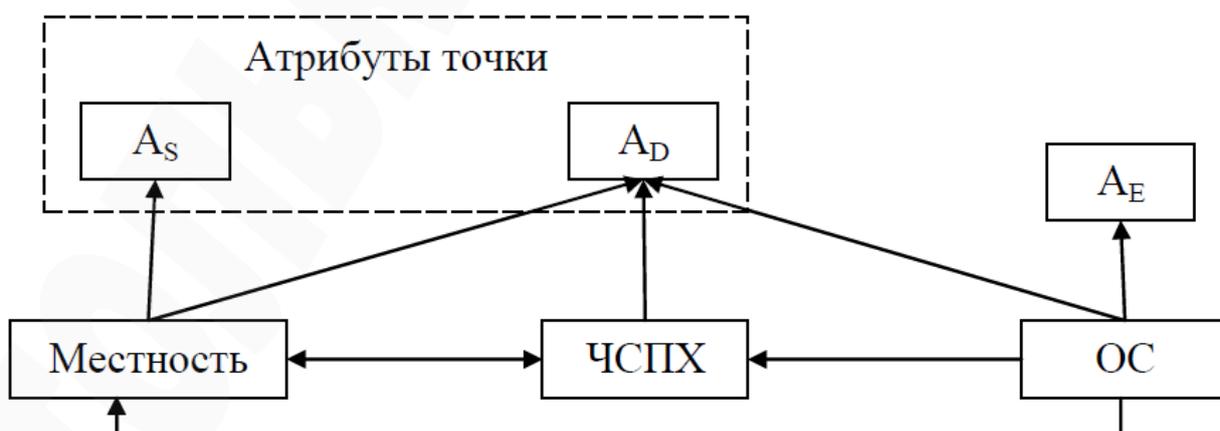


Рис. 1. Атрибуты точки

Для решения первой задачи исследования (построения статической модели ЭС) была построена статическая модель ТС, не подверженной ЧСПХ.

Основным структурным элементом экосистемы, а также и основным звеном в задаче пространственной привязки, представления и анализа информации о подверженности экосистемы ЧСПХ, принимается *геотаксон* $g \subset X$ – объект, обладающий следующими свойствами:

- 1) привязки к координатам пространства X ;
- 2) наглядности (геотаксоны представляют собой участки местности, с которыми ЛПР привык иметь дело);
- 3) однородности (с точки зрения значений набора определенных атрибутов);
- 4) сравнимости (описания объектов должны позволять осуществить их адекватное сравнение).

Декомпозиция пространства X на геотаксоны происходит с помощью отношения неразличимости Павлака на основе множества статических атрибутов A_S и формирует статическое топологическое пространство $T_{G_X}^{A_S}$ [13, 14]:

$$T_{G_X}^{A_S} = (X, Def(G_X^{A_S})), \quad (1)$$

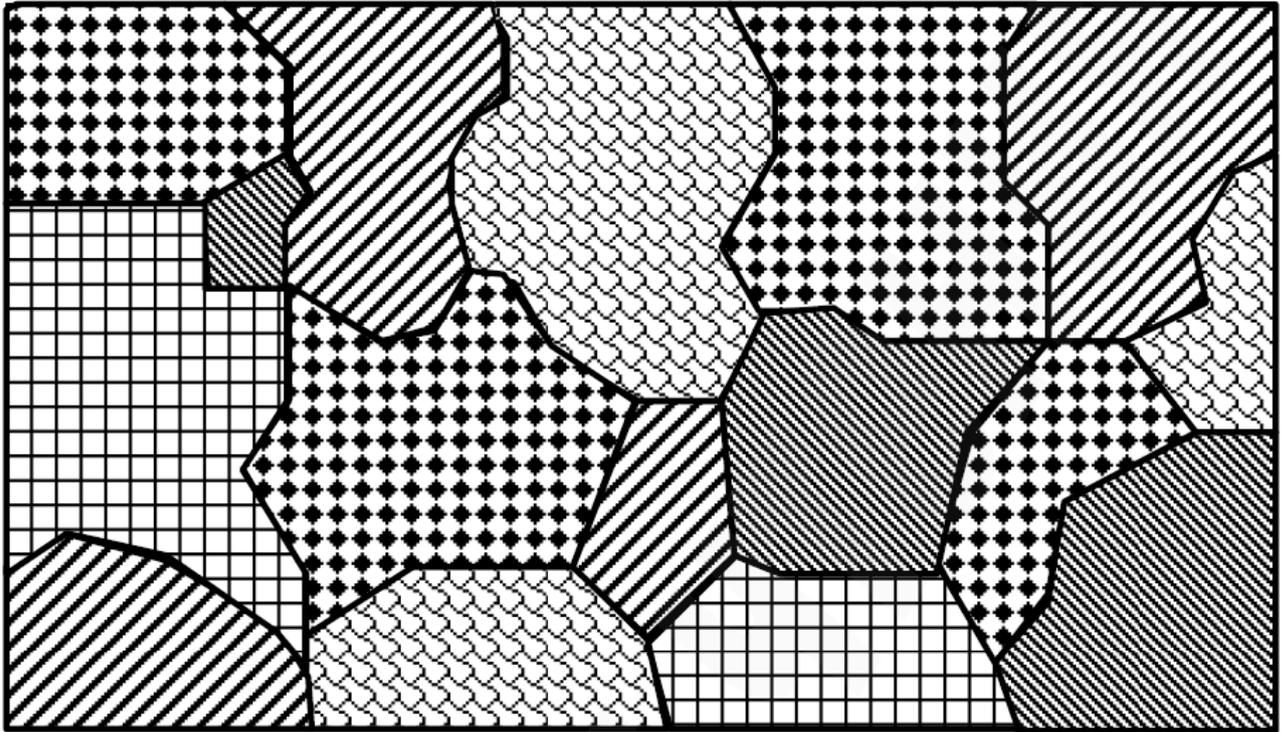
где $G_X^{A_S}$ – множество геотаксонов;

$Def(G_X^{A_S})$ – семейство составных множеств из множества геотаксонов.

Топологическое пространство (1) порождается отношением A_S -неразличимости, разбивающем пространство X на непересекающиеся классы эквивалентности, каждый из которых в общем случае может быть несвязным (рис. 2). При этом геотаксоны являются попарно непересекающимися множествами, являющимися компонентами связности топологического пространства, а их дизъюнктивное объединение совпадает с множеством X .

Таким образом, геотаксон рассматривается как связное и однородное с точки зрения значений статических атрибутов A_S подпространство. В общем случае свойство однородности может рассматриваться относительно различных подмножеств параметров состояния (вариантов). Более того, оператор равенства может быть задан строго (как отношение эквивалентности) либо нестрого (как отношение подобия). В последнем случае нестрогое равенство значений параметров состояния дает возможность «размывать» границы геотаксонов.

Следует заметить, что в большинстве современных геоинформационных систем (ГИС) статистика ведется с привязкой к пронумерованным участкам местности, свойства которых вполне соответствуют определению геотаксона. Это позволяет рассматривать геотаксоны в ГИС как однородные пронумерованные участки местности и использовать их моделирования статистики экосистемы.



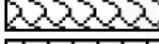
-  - класс эквивалентности 1
-  - класс эквивалентности 2
-  - класс эквивалентности 3
-  - класс эквивалентности 4
-  - класс эквивалентности 5

Рис. 2. Топологическое пространство, порожденное классами эквивалентности

Для моделирования динамики экосистемы в условиях ЧСПХ (вторая задача исследования) ТС дискретизируется на более мелкие картографические объекты (КО) с помощью сетки равновеликих координатно-ориентированных элементов (ячеек) квадратной формы C , что позволяет осуществить переход от непрерывной формы представления геоинформации внутри геотаксона к дискретной – в масштабе отдельных ячеек, каждая из которых считается однородной с точки зрения всех атрибутов из множества A . Ячейки используются для моделирования динамики ЧСПХ.

Декомпозиция подпространства X Евклидова пространства с помощью ячеек является топологическим пространством:

$$T_C = (X, Def(C)), \quad (2)$$

наложенным на топологическое пространство геотаксонов $T_{G_X}^{A_S}$, где $Def(C)$ – семейство всех составных множеств, полученных из множества ячеек C , включая пустое множество \emptyset и множество C . В отличие от топологического пространства геотаксонов, которое формируется на основе отношения A_S -неразличимости, топологическое пространство ячеек формируется простой

дискретизацией пространства X на равновеликие участки (ячейки). При этом ячейки являются попарно-непересекающимися A -неразличимыми множествами, а их дизъюнктивное объединение совпадает с множеством X .

Моделирование динамики ЧСПХ на сетке из ячеек заключается в моделировании смен состояния ячеек. Будем считать, что при изменении своего состояния в условиях ЧСПХ ячейка проходит через последовательность качественно различных категорий состояний (например, не охвачена ЧСПХ, охвачена ЧСПХ и т. д.) – «возможных миров» W_D .

Поскольку каждая ячейка принадлежит определенному геотаксону, который, в свою очередь, принадлежит определенному классу эквивалентности, порожденному отношением A_S -неразличимости, будем считать эти классы эквивалентности статическими возможными мирами. Множество таких возможных миров обозначим W_S . Исходя из вышесказанного, можно определить обобщенный возможный мир каждой ячейки, состоящий из двух миров: статического и динамического. Обозначим множество обобщенных миров W :

$$W = W_S \times W_D. \quad (3)$$

Все множество ячеек C условно подразделим на подмножество ячеек C^K , подверженных воздействию ЧСПХ определенного класса K , и подмножество ячеек $C^{\bar{K}}$, не подверженных воздействию ЧСПХ класса K :

$$C = C^K \cup C^{\bar{K}}. \quad (4)$$

Первое подмножество ячеек, в отличие от второго, содержит параметры с изменяющимися значениями из подмножества параметров A_D (рис. 3).

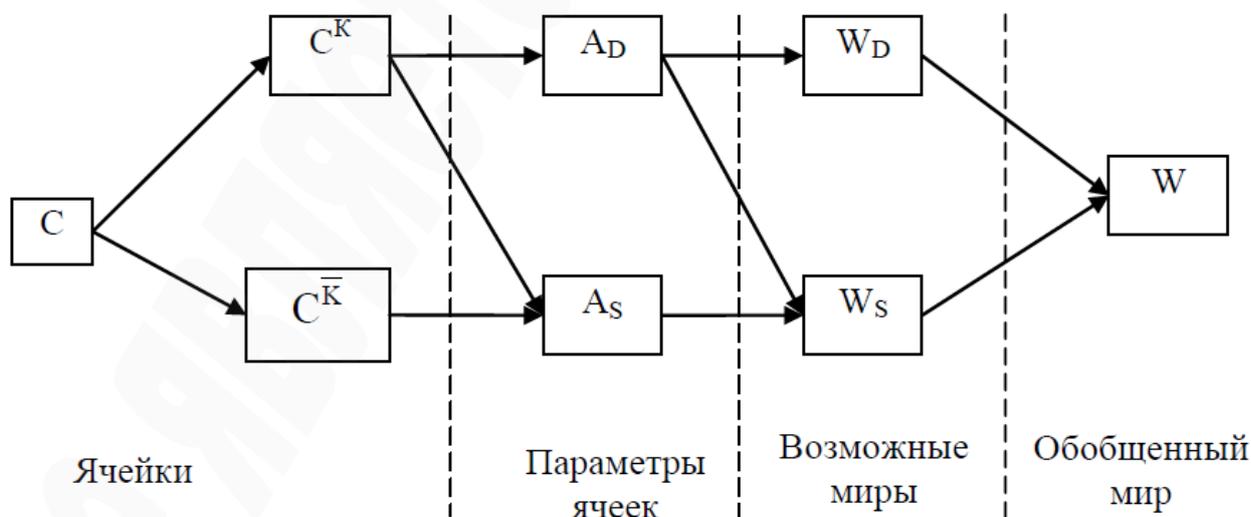


Рис. 3. Ячейки и возможные миры

Во множестве ячеек C построено динамическое бинарное отношение w_D -неразличимости $\mathfrak{R}_C^{w_D}$, которое в любой момент времени t позволяет отнести каждую ячейку c к одному из возможных динамических миров из множества W_D . Данное отношение является отношением эквивалентности и порождает строгую топологию, то есть разбиение множества ячеек C на четкие подмножества ячеек:

$$C^{w_i}(t), i = 1, \dots, n-1,$$

где $C^{w_i}(t)$ – подмножество ячеек, находящихся в мире w_i , n – количество возможных динамических миров.

Классы эквивалентности $C^{w_i}(t)$, $i = 0, \dots, n-1$, порожденные отношением $\mathfrak{R}_C^{w_D}$, представляют собой модель динамики экосистемы в условиях ЧСПХ в виде динамического топологического пространства $T_C^{w_D}(t)$. Наложение топологических пространств, моделирующих динамику ЧСПХ и множество геотаксонов, образует динамическое топологическое пространство $T_C^{A_S \cup w_D}(t)$, компонентами связности которого являются подмножества $A_S \cup w_D$ -неразличимых ячеек (рис. 3).

Для того, чтобы данная модель была более приближена к реальности, предложено вместо строгого отношения эквивалентности $\mathfrak{R}_C^{w_D}(t)$ использовать его нечеткое обобщение $\tilde{\mathfrak{R}}_C^{w_D}(t)$, которое в каждый момент времени t порождает нечеткое пространство аппроксимации $\tilde{apr}_C(t) = (C, \tilde{\mathfrak{R}}_C^{w_D}(t))$ и нечеткую топологию, то есть разбиение множества ячеек C в каждый момент времени t на нечеткие множества ячеек $\tilde{C}^{w_i}(t)$, $i = 0, \dots, n-1$, находящихся в каждом из возможных динамических миров из множества W_D .

Динамическое топологическое пространство, порожденное нечетким отношением $\tilde{\mathfrak{R}}_C^{w_D}(t)$, является моделью ТС в условиях ЧСПХ.

6. Результаты исследований

Представленная в данной работе модель ТС в условиях ЧСПХ реализована на языке программирования Python с помощью фреймворка Django и его расширения GeoDjango в виде географической веб-ориентированной СППР GIS Forest Project. При создании проекта были использованы библиотека OpenLayers для создания карт, а также система управления базами данных PostgreSQL.

С помощью созданного программного обеспечения были произведены эксперименты для оценки быстродействия СППР с использованием переходной функции, реализованной в виде модели распространения пожара Жариковой [15]. В ходе эксперимента исследовалось влияние размера ячейки на время

расчета области, занятой пожаром. Для проведения расчетов было выбрано Цюрупинское лесное хозяйство Херсонской области.

На рис. 4 представлена карта Цюрупинского (Херсонской обл.) лесничества, реализованная в СППР Disaster Risk Management в виде совокупности геотаксонов и дискретизированная координатной сеткой с переменным размером ячейки (δ). Каждый геотаксон представлен однородным участком местности с привязанной к нему информацией из базы данных.

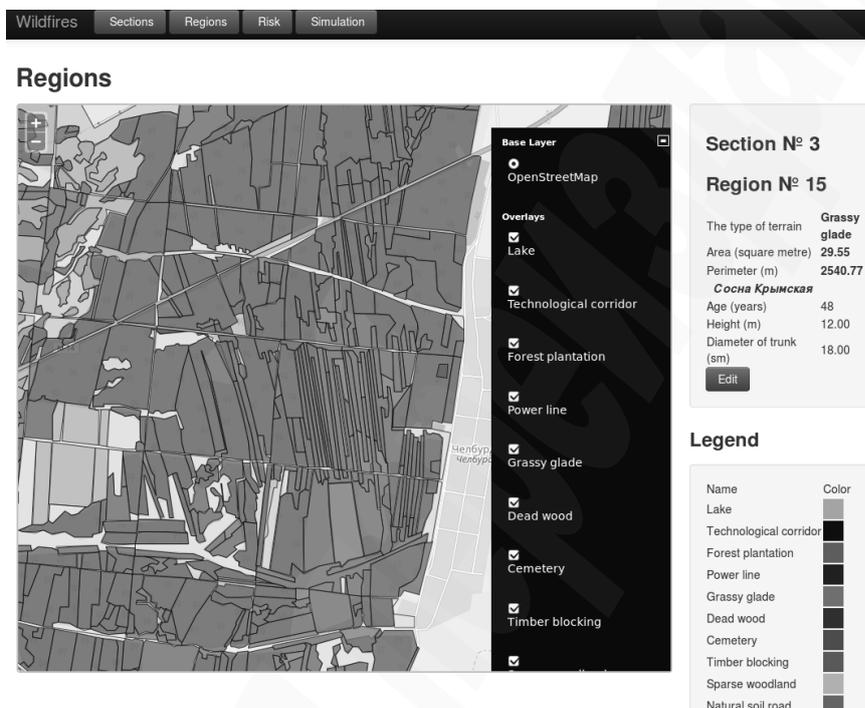


Рис. 4. Представление совокупности геотаксонов Цюрупинского лесничества в программе Disaster Risk Management

В ходе эксперимента исследовалось влияние размера ячейки δ на время, необходимое для моделирования распространения пожара площадью 40000 м² и на точность аппроксимации контура пожара. Эксперименты осуществлялись при различной величине ячейки, но при одинаковых параметрах ОС. В качестве источника пожара принималась ячейка, расположенная внутри геотаксона, соответствующего 15-му выделу 3-го квартала лесничества. Результаты эксперимента представлены в табл. 1.

Согласно результатам эксперимента, представленным в табл. 1, дискретизация пространства координатной сеткой ячеек с размером меньше 8 м приводит к резкому увеличению времени вычисления, а при размере ячеек от 18 до 22 м точность аппроксимации является недостаточной. Таким образом, оптимальным размером ячеек с точки зрения быстродействия и точности вычисления, является размер от 18 до 22 м.

Таблица 1

Результаты эксперимента

№ п/п	Размер ячейки δ , м	Время вычислений, мин	Погрешность аппроксимации, %
1	22	5	45,5
2	20	5,5	34
3	18	6	25
4	16	7,5	20,5
5	14	9	15
6	12	9	13,5
7	10	15,5	11
8	8	19	9,5
9	6	32	8
10	4	54	7,5

Данные показатели можно использовать для выбора лучшего расположения пожарной части и подбора подъездных путей для тушения пожара. В связи с чем, потери национального лесного хозяйства при возникновении пожара будут минимальны.

7. SWOT-анализ результатов исследований

Strengths. Дискретизация пространства рассмотрения координатной сеткой ячеек с размером меньше 8 м приводит к резкому увеличению времени вычисления. Предложенная модель ЧСПХ может обеспечить приемлемые характеристики по точности и быстродействию при дискретизации пространства (местности) с размерами ячеек от 8 м до 18 м.

Weaknesses. При размере ячеек от 18 до 22 м точность аппроксимации является недостаточной.

Opportunities. В перспективе планируется использование предложенной модели экосистемы для разработки риск-ориентированных моделей и методов интеллектуальной поддержки принятия решений в условиях ЧСПХ.

Проведенные исследования можно использовать для максимально быстрой ликвидации пожара, что приведет к минимизации потерь как финансовых, так и материальных ресурсов лесного хозяйства.

Threats. На данное направление исследования может негативно повлиять отсутствие нормативной базы в Украине, регламентирующей современные методы оценки опасности и риска ЧСПХ.

8. Выводы

1. Построена статическая модель ЭС в виде топологического пространства, порожденного отношением неразличимости, что позволило представить сестность в виде множества однородных участков – геотаксонов.

2. Разработана динамическая модель ЭС в условиях ЧСПХ в виде нечеткого динамического топологического пространства, что позволило

снизить вычислительную сложность и обеспечить приспособление к условиям неполной и неточной информации.

Динамическая модель ЭС в условиях ЧСПХ основана на разбиении пространства на конечное множество непересекающихся однородных участков – геотаксонов, и последующей их дискретизации координатной сеткой равновеликих ячеек. Динамика распространения ЧСПХ отражается в виде смен состояний ячеек.

Предложенная модель может быть использована в СППР по противодействию ЧСПХ, основанных на геоинформационных системах, и при дискретизации координатной сеткой ячеек размером от 8 м до 18 м обеспечивает достаточные показатели СППР по точности и быстрдействию.

Литература

1. Martinez, J. Human-caused wildfire risk rating for prevention planning in Spain [Text] / J. Martinez, C. Vega-Garcia, E. Chuvieco // Journal of Environmental Management. – 2009. – Vol. 90, № 2. – P. 1241–1252. doi:[10.1016/j.jenvman.2008.07.005](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.07.005)
2. Atkinson, D. Implementation of quantitative bushfire risk analysis in a GIS environment [Text] / D. Atkinson, M. Chladil, V. Janssen, A. Lucieer // International Journal of Wildland Fire. – 2010. – Vol. 19, № 5. – P. 649–658. doi:[10.1071/wf08185](https://doi.org/10.1071/wf08185)
3. Preisler, H. K. Probability based models for estimating wildfire risk [Text] / H. K. Preisler, D. R. Brillinger, R. E. Burgan, J. W. Benoit // International Journal of Wildland Fire. – 2004. – Vol. 13, № 2. – P. 133–142. doi:[10.1071/wf02061](https://doi.org/10.1071/wf02061)
4. Chuvieco, E. Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and geographic information system technologies [Text] / E. Chuvieco, I. Aguado, M. Yebra, H. Nieto, J. Salas, M. P. Martin et al. // Ecological Modelling. – 2010. – Vol. 221, № 1. – P. 46–58.
5. Genton, M. G. Spatio-temporal analysis of wildfire ignitions in the St Johns River Water Management District, Florida [Text] / M. G. Genton, D. T. Butry, M. L. Gumpertz, J. P. Prestemon // International Journal of Wildland Fire. – 2006. – Vol. 15, № 1. – P. 87–97. doi:[10.1071/wf04034](https://doi.org/10.1071/wf04034)
6. Albin, F. A. Wildland Fire Spread by Radiation-a Model Including Fuel Cooling by Natural Convection [Text] / F. A. Albin // Combustion Science and Technology. – 1986. – Vol. 45, № 1-2. – P. 101–113. doi:[10.1080/00102208608923844](https://doi.org/10.1080/00102208608923844)
7. Albin, F. A. A Model for Fire Spread in Wildland Fuels by-Radiation [Text] / F. A. Albin // Combustion Science and Technology. – 1985. – Vol. 42, № 5-6. – P. 229–258. doi:[10.1080/00102208508960381](https://doi.org/10.1080/00102208508960381)
8. Alexander, M. An Example of Multi-faceted Wildland Fire Research: The International Crown Fire Modelling Experiment [Text] / M. Alexander, B. Stocks, B. Wotton, R. Lanoville // Proceedings of the Third International Conference on Forest Fire Research, Luso. – Portugal: University of Coimbra, 1998. – P. 83–112.
9. Baranovskiy, N. A Web-Oriented Geoinformation System Application for Forest Fire Danger Prediction in Typical Forests of the Ukraine [Text] / N. Baranovskiy, M. Zharikova // Thematic Cartography for the Society. Lecture notes in geoinformation and cartography. – Springer, 2014. – P. 13–22. doi:[10.1007/978-3-319-08180-9_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-08180-9_2)

10. Zharikova, M. Threat assessment method for intelligent disaster decision support system [Text] / M. Zharikova, V. Sherstjuk // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2016. – Vol. 512. – P. 81–99. doi:[10.1007/978-3-319-45991-2_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-45991-2_6)

11. Zharikova, M. Development of the model of natural emergencies in decision support system [Text] / M. Zharikova, V. Sherstjuk // Eastern-European Journal Of Enterprise Technologies. – 2015. – № 1/4 (73). – P. 62–74. doi:[10.15587/1729-4061.2015.37801](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.37801)

12. Abd El-Monsef, M. E. On relationships between revised rough fuzzy approximation operators and fuzzy topological spaces [Text] / M. E. Abd El-Monsef, M. A. El-Gayar, R. M. Aqeel // International Journal of Granular Computing, Rough Sets and Intelligent Systems. – 2014. – Vol. 3, № 4. – P. 257–269. doi:[10.1504/ijgersis.2014.068022](https://doi.org/10.1504/ijgersis.2014.068022)

13. Pawlak, Z. Rough Sets [Text] / Z. Pawlak // Rough Sets and Data Mining. – Springer US, 1997. – P. 3–7. doi:[10.1007/978-1-4613-1461-5_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4613-1461-5_1)

14. Pawlak, Z. Vagueness – a Rough Set View [Text] / Z. Pawlak // Structures in Logic and Computer Science. Lecture Notes in Computer Science. – Springer Berlin Heidelberg, 1997. – P. 106–117. doi:[10.1007/3-540-63246-8_7](https://doi.org/10.1007/3-540-63246-8_7)

15. Grab, M. V. Models, methods and algorithms of forest fire spreading [Text]: PhD dissertation: 01.05.02 / M. V. Grab. – Kharkiv: Kharkiv University of Radioelectronics, 2004. – 230 p.