

МОДЕЛЬ ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ ПРИРОДНОГО ХАРАКТЕРА

Актуальность. В статье рассматривается динамическая пространственная модель территориальной системы в условиях чрезвычайных ситуаций природного характера, предназначенная для решения задач поддержки принятия решений и представляющая собой модель сложной динамической системы. Анализ литературных источников показал, что применение устоявшихся подходов для рассматриваемого класса сложных динамических систем не обеспечивает требуемого быстродействия и приемлемой эффективности систем поддержки принятия решений. Это обуславливает актуальность дальнейшего поиска нетрадиционных моделей и методов поддержки принятия решений, способных обеспечить выполнение предъявляемых к подобным системам требований по быстродействию и эффективности.

Цель. Целью исследования является уменьшение убытков от чрезвычайных ситуаций природного характера за счет повышения качества и своевременности прогнозирования динамики территориальных систем в условиях чрезвычайных ситуаций природного характера.

Метод. Концепция территориальной системы в условиях чрезвычайных ситуаций природного характера представлена в виде наложения статических и динамических топологических пространств, порожденных отношением неразличимости, каждое из которых позволяет представлять географическую и атрибутивную информацию о природных условиях, о требующих защиты ценных объектах, а также о динамике чрезвычайных ситуаций природного характера. Модель динамики чрезвычайных ситуаций природного характера построена на основе дискретизации пространства сеткой равновеликих квадратных ячеек и представлена в виде нечеткого динамического топологического пространства во множестве ячеек.

Результаты. На основе разработанной концепции и модели создана географическая веб-ориентированная система поддержки принятия решений. Были проведены эксперименты, которые показали, что предложенная модель чрезвычайных ситуаций природного характера может обеспечить приемлемые характеристики по точности и быстродействию при дискретизации пространства (местности) с размерами ячеек от 8 м до 18 м.

Выводы. Впервые разработана концепция представления территориальных систем в условиях чрезвычайных ситуаций природного характера в виде наложения статических и динамических топологических пространств. Впервые разработана формальная модель динамики чрезвычайных ситуаций природного характера в виде движения граничной области нечетко-приближенного множества, что позволило снизить вычислительную сложность и обеспечить приспособление к условиям неполной и неточной информации. Разработано программное обеспечение, реализующее предложенную концепцию и метод, на основе которого решена практическая задача поддержки принятия решений в условиях чрезвычайных ситуаций природного характера.

Ключевые слова: территориальная система, отношение неразличимости, топологическое пространство, класс эквивалентности, геотаксон, чрезвычайная ситуация природного характера.

НОМЕНКЛАТУРА

ЧСПХ – чрезвычайная ситуация природного характера;

ТС – территориальная система;

ГИС – геоинформационная система;

СДС – сложная динамическая система;

ППР – поддержка принятия решений;

СППР – система поддержки принятия решений;

ЛПР – лицо, принимающее решения;

КО – картографический объект;

ОС – окружающая среда;

ГИС – геоинформационная система;

БД – база данных;

X – подпространство двумерного Евклидова пространства;

Ξ – территориальная система;

A – набор атрибутов точки пространства;

P – подмножество атрибутов точки пространства;

\mathfrak{R}_X^P – отношение P -неразличимости по Павлаку во множестве точек пространства X ;

$f(x, a)$ – значение атрибута $a \in A$ точки $x \in X$;

X / \mathfrak{R}_X^P – семейство классов эквивалентности, на которые отношение \mathfrak{R}_X^P разбивает множество X ;

apr_X^P – пространство аппроксимации;

$Def(apr_X^P)$ – семейство всех составных множеств пространства аппроксимации apr_X^P ;

T_X^P – топологическое пространство, порожденное отношением P -неразличимости во множестве X ;

A_S – набор статических атрибутов;

A_D – набор динамических атрибутов;

A_E – набор параметров окружающей среды;

$T_X^{A_S}$ – топологическое пространство, порожденное отношением A_S -неразличимости во множестве X ;

g^{A_S} – геотаксон;

$\mathfrak{R}_X^{A_S}(g^{A_S})$ – класс эквивалентности, к которому принадлежит геотаксон g^{A_S} ;

$G_X^{A_S}$ – множество геотаксонов;

$Def(G_X^{A_S})$ – семейство составных множеств, полученных из множества геотаксонов, включая пустое множество и универсальное множество X ;

$T_{G_X}^{As}$ – топологическое пространство, компонентами связности которого являются геотаксоны;

$Def(C)$ – семейство составных множеств, полученных их множества ячеек C ;

T_C – топологическое пространство, компонентами связности которого являются ячейки;

$W_D = \{w_{D0}, w_{D1}, \dots, w_{Dn}\}$ – множество динамических «возможных миров ячейки»;

W_S – множество статических «возможных миров» ячейки;

W – множество обобщенных миров ячейки;

$\mathfrak{R}_C^{A_i}$ – отношение A_i -неразличимости во множестве ячеек;

$\mathfrak{R}_C^{A_i}(c)$ – класс эквивалентности во множестве ячеек, порожденный отношением A_i -неразличимости;

$Def(apr_C^{A_i})$ – пространство аппроксимации во множестве ячеек;

$apr_C^{A_i} = (C, \mathfrak{R}_C^{A_i})$ – семейство всех составных множеств пространства аппроксимации во множестве ячеек;

$T_C^{A_i}$ – топологическое пространство, порожденное отношением A_i -неразличимости во множестве ячеек;

G_C^{As} – множество геотаксонов, аппроксимированных ячейками;

$(G_C^{As})_i$ – множество геотаксонов, аппроксимированных ячейками, которые принадлежат i -му классу эквивалентности, порожденному отношением A_S -неразличимости во множестве ячеек;

$Def(G_C^{As})$ – семейство всех составных множеств, полученных из множества G_C^{As} ;

$T_{G_C}^{As}$ – топологическое пространство, построенное с помощью декомпозиции подпространства аппроксимации C пространства X с помощью геотаксонов, аппроксимированных ячейками;

$\mathfrak{R}_C^{w_D}$ – отношение w_D -неразличимости во множестве ячеек;

$C^{w_i}(t)$ – подмножество ячеек, находящихся в момент времени t в мире w_i ;

$T_C^{w_D}(t), T_C^{A_S \cup w_D}(t)$ – топологические пространства, порожденные отношениями w_D - и $A_S \cup w_D$ -неразличимости во множестве ячеек;

$\tilde{\mathfrak{R}}_C^{w_D}(t)$ – нечеткое отношение w_D -неразличимости во множестве ячеек;

$\tilde{apr}_C(t)$ – нечеткое пространство аппроксимации во множестве ячеек;

$\tilde{C}^{w_i}(t)$ – нечеткое множество ячеек, находящихся в мире w_i в момент времени t .

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивность и частота ЧСПХ значительно повысились на протяжении последних десятилетий в связи с ростом численности населения и промышленного производства, массовой урбанизацией, деградацией природной среды, глобальным потеплением и т. д. В данной статье ЧСПХ рассматривается во взаимосвязи с ТС – целостным территориальным образованием, формирующимся в тесном взаимодействии природных и искусственных объектов. ТС относится к классу ГИС и обладает следующими отличительными особенностями: имеет пространственную привязку; объединяет в себе модель территории, природных и искусственных объектов; имеет послонную структуру.

ЧСПХ представляют собой класс процессов разрушительного характера, обладающих следующими отличительными особенностями: развиваются в пространстве и времени; возникают чаще всего внезапно, в результате чего сложны в предупреждении; протекают в условиях неопределенности; наносят ущерб объектам ТС; развиваются в условиях дефицита времени и ресурсов.

ТС в условиях ЧСПХ представляет собой СДС, включающую множество взаимосвязанных процессов, развивающихся в пространстве и времени, для которых особо актуальными являются задачи ППР. Поскольку одновременно на данную СДС воздействует значительное число факторов и событий, имеющих в том числе стохастическую природу, а развивающиеся при этом процессы, как правило, нелинейны, нестационарны и быстротечны, построение СППР представляет собой сложную и нетривиальную задачу, которая еще больше усложняется неточностью, неполнотой и противоречивостью исходной информации, значительной территориальной распределенностью событий и дефицитом времени. Неотъемлимой частью построения СППР является моделирование динамики ЧСПХ и ее воздействия на объекты, требующие защиты.

Несмотря на активные исследования, применение устоявшихся подходов для рассматриваемого класса СДС не обеспечивает требуемого быстродействия и приемлемой эффективности СППР, основанных на ГИС. Это обуславливает актуальность дальнейшего поиска нетрадиционных моделей и методов поддержки принятия решений, основанных на использовании геоинформационных систем реального времени и способных обеспечить выполнение предъявляемых к СППР требований по быстродействию и эффективности.

Таким образом, объектом исследования являются ТС в условиях ЧСПХ, предметом исследования являются модель динамики ТС в условиях ЧСПХ.

В связи с этим целью исследования является уменьшение убытков от ЧСПХ за счет повышения качества и своевременности прогнозирования динамики ТС в условиях ЧСПХ, что позволит более обоснованно принимать решения по локализации и противодействию ЧСПХ. Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

– построить статическую модель ТС в виде топологического пространства, порожденного отношением неразличимости;

– разработать динамическую модель ТС в условиях в виде нечеткого динамического топологического пространства, что позволило снизить вычислительную сложность и обеспечить приспособление к условиям неполной и неточной информации.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Проведенные в данной работе исследования имели целью построить приближенную пространственную модель территориальной системы в условиях ЧСПХ, пригодную для решения задач поддержки принятия решений по противодействию ЧСПХ с использованием методов теории топологии, а также нечетких множеств.

В качестве исходных данных рассматривается участок местности, подверженный воздействию ЧСПХ. Участок местности состоит из однородных статических природных и искусственных объектов (участки леса, водисточники, пески и т.д.) – геотаксонов. Модель местности во взаимосвязи с природными и искусственными объектами называется ТС.

Для моделирования динамики геотаксонов в условиях ЧСПХ ТС дискретизируется на равновеликие квадратные ячейки, каждая из которых считается однородной. Динамика ТС в условиях ЧСПХ представлена в виде смен состояний ячеек, которые моделируются с помощью заранее заданной модели.

Вычислительный эксперимент, описанный в данной статье, был проведен на примере Цюрупинского лесничества Херсонской области, Украина. В качестве ЧСПХ был рассмотрен лесной пожар, динамика которого была смоделирована с помощью модели Жариковой [1]. Критерием оценки качества результата является быстродействие расчетов.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В настоящее время большое внимание уделяется моделированию ЧСПХ. В работах [2–4] 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, 6] используются детальные математические модели физико-химических процессов, протекающих при ЧСПХ при определенном состоянии внешней среды на однородных участках местности, что позволяют достаточно точно определять границы контура ЧСПХ в заданные моменты времени. Недостатком использования таких моделей является их высокая вычислительная сложность. В [7] модель ЧСПХ в значительной мере упрощается, что позволяет ускорить вычисления, но снижает их точность, вследствие чего снижается и убедительность оценки ситуации [8, 9].

Существующие пространственные модели динамики ЧСПХ подразделяются на 2 категории: векторные и растровые. В векторных моделях [11] контур ЧСПХ представлен замкнутой ломаной линией, заданной множеством точек-узлов, каждый из которых представлен локальным источником. Множество локальных очагов, сформированных от локальных источников, в каждый

момент времени формируют новый контур ЧСПХ. К таким моделям относится модель распространения лесного пожара Финни [12]. Основным недостаток векторного подхода состоит в необходимости проведения сложных вычислений для генерации выпуклого контура ЧСПХ в каждый момент времени. При растровом подходе территория дискретизируется с помощью сетки из ячеек, а динамика ЧСПХ представляется в виде смены состояний ячеек (клеточный автомат). Этот подход является более эффективным с точки зрения вычислительной сложности [13], однако менее точным. Существуют также подходы, комбинирующие растровый и векторный. К таким подходам относится, например, усовершенствованный растровый подход к моделированию динамики лесного пожара Труфино, согласно которому строятся локальные контуры распространения пожаров в виде эллипсов, которые распространяются по ячейкам. При этом повышается точность, но появляются дополнительные вычислительные сложности по сравнению с растровым подходом [14].

По результатам анализа литературных источников можно сделать вывод о том, что требуемое для ЛПР быстродействие СППР может быть достигнуто с помощью построения адекватной пространственной модели территории в условиях ЧСПХ. Поскольку ЧСПХ обладают свойством неполной наблюдаемости, а неполнота и неточность измерения различных характеристик событий позволяют существенно смягчить требования по точности представления исходной информации, можно сделать вывод, что требуемое быстродействие СППР может быть достигнуто с помощью некоторого округления (размывания) пространственной модели, что позволит значительно снизить требования к модели ЧСПХ по точности.

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 формирования ТС в условиях ЧСПХ, представляющей пространственную модель в СППР, будем использовать топологические пространства, а для ее размывания могут быть использованы методы теорий нечетких множеств [8, 9].

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Модель местности, или территории, в пределах которой развивается ЧСПХ, представляет собой 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 [9, 15, 16].

Построим статическую модель ТС, не подверженную ЧСПХ, в совокупности с природными объектами и окружающей средой. Пусть каждая точка пространства X обладает набором атрибутов A . Для любого непустого подмножества атрибутов $P \in A$ определим отношение эквивалентности во множестве X (рефлексивное, симметричное, транзитивное отношение):

$$\mathfrak{R}_X^P = \{(x, y) \in X \times X | \forall a \in P, f(x, a) = f(y, a)\}, \quad (1)$$

которое называется отношением P -неразличимости по Павлаку [17]. Если $(x, y) \in \mathfrak{R}_X^P$, то говорят, что точки x и y P -неразличимы (относительно атрибутов из множества P). Отношение \mathfrak{R}_X^P разбивает множество X на семейство классов эквивалентности X/\mathfrak{R}_X^P . Получаем пространство аппроксимации:

$$apr_X^P = (X, \mathfrak{R}_X^P). \quad (2)$$

Пусть $Def(apr_X^P)$ – семейство всех составных множеств пространства аппроксимации (2), включая пустое множество \emptyset и универсальное множество X . Получаем топологическое пространство, порожденное отношением P -неразличимости на подпространстве двумерного Евклидова пространства X :

$$T_X^P = (X, Def(apr_X^P)). \quad (3)$$

Класс эквивалентности $\mathfrak{R}_X^P(x) \in X/\mathfrak{R}_X^P$ в общем случае является несвязным подпространством пространства X , состоящим из непустых открытых непересекающихся множеств. На рис. 1 отображен пример топологического пространства, порожденного отношением P -неразличимости, разбивающего пространство X на 5 непересекающихся классов эквивалентности, каждый из которых является несвязным.

Совокупность всех открытых подмножеств, принадлежащих семейству составных множеств $Def(apr_X^P)$, является открытым покрытием топологического пространства, так как объединение этих множеств составляет мно-

жество $X: \bigcup_{X_i \in Def(apr_X^P)} X_i = X$. Множество классов эквивалентности $X/\mathfrak{R}_X^P \subset Def(apr_X^P)$ является подпокрытием топологического пространства, так как объединение этих множеств также является множеством X [17]:

$$\bigcup_{X_i \in X/\mathfrak{R}_X^P} X_i = X.$$

Пусть множество атрибутов A любой точки подразделяется на два подмножества: статических атрибутов A_S (не изменяющихся во времени) и динамических атрибутов A_D (изменяющихся во времени), $A = A_S \cup A_D$. К статическим атрибутам относятся атрибуты, описывающие местность, такие, как тип растительности, ее геометрические параметры, возраст и т.д. Динамические атрибуты описывают динамику КО в условиях развивающейся ЧСПХ. В отдельное множество выделим совокупность параметров ОС A_E , таких как скорость и направление ветра, влажность воздуха, температура воздуха, значения которых не привязаны к определенным КО.

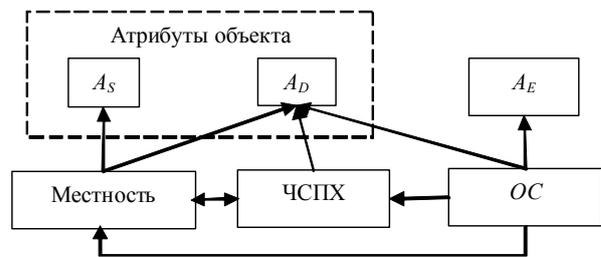
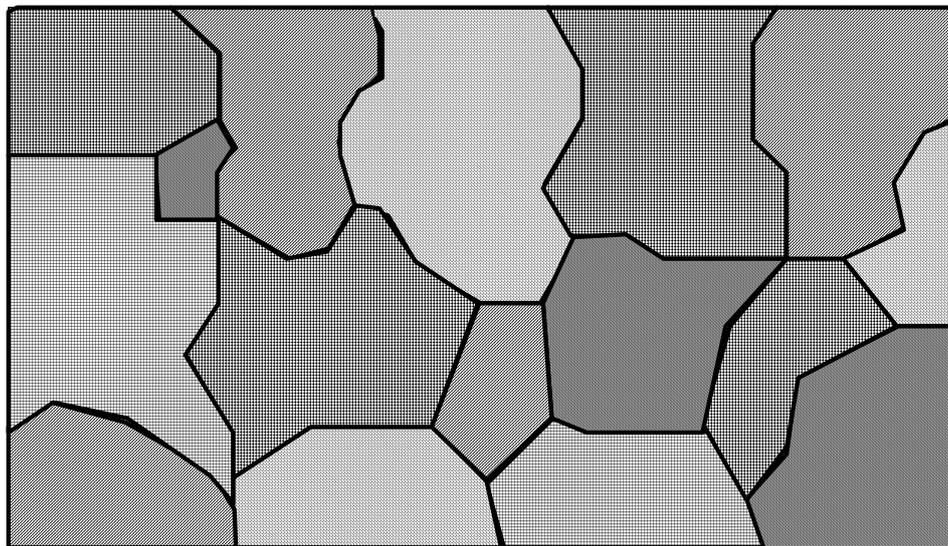


Рисунок 2 – Виды атрибутов



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

Рисунок 1 – Топологическое пространство, порожденное классами эквивалентности

Если $P \subseteq A_S$, то классы эквивалентности семейства X/\mathfrak{R}_X^P , порожденные отношением P -неразличимости, представляют собой статические множества, не изменяющиеся во времени, и соответственно топологическое пространство (3) является статическим. Если $P \cap A_D \neq \emptyset$, то классы эквивалентности семейства X/\mathfrak{R}_X^P представляют собой динамические множества, и соответственно топологическое пространство (3) является динамическим.

Для рассмотрения ТС, не подверженной влиянию ЧСПХ, остановимся на подмножестве статических атрибутов $P = A_S$. Основным структурным элементом ТС Ξ , а также и основным звеном в задаче пространственной привязки, представления и анализа информации о подверженности территориальной системы ЧСПХ, является статический КО, являющийся компонентой связности топологического пространства $T_X^{A_S}$, построенного с помощью отношения A_S -неразличимости на основе подмножества статических атрибутов A_S , обладающий следующими свойствами:

- 1) привязки к координатам пространства X ;
- 2) наглядности (данные КО представляют собой участки местности, с которыми ЛПР привык иметь дело);
- 3) однородности (все точки данного КО являются A_S -неразличимыми);
- 4) связности (каждый такой КО является компонентой связности топологического пространства $T_X^{A_S}$);
- 5) статичности (данный КО построен с помощью отношения A_S -неразличимости на основе подмножества статических атрибутов);
- 6) множество таких КО является подпокрытием топологического пространства $T_X^{A_S}$;
- 7) сравнимости (описания таких КО должны позволять их адекватно сравнивать).

В качестве такого КО будем использовать понятие геотаксона g^{A_S} – статического КО, являющегося связным подмножеством определенного класса эквивалентности, $x \in g^{A_S} \rightarrow g^{A_S} \subseteq \mathfrak{R}_X^{A_S}(x) \in X/\mathfrak{R}_X^{A_S}$. Класс эквивалентности, к которому принадлежит геотаксон g^{A_S} , обозначим $\mathfrak{R}_X^{A_S}(g^{A_S})$. Геотаксоны, принадлежащие одному классу эквивалентности, являются A_S -неразличимыми. Декомпозиция пространства X на геотаксоны формирует статическое топологическое пространство $T_{G_X}^{A_S}$ [18–20]:

$$T_{G_X}^{A_S} = (X, \text{Def}(G_X^{A_S})), \quad (4)$$

наложенное на топологическое пространство $T_X^{A_S}$, где $G_X^{A_S}$ – множество геотаксонов, $\text{Def}(G_X^{A_S})$ – семейство составных множеств, полученных из множества геотаксонов, включая пустое множество и универсальное множество X .

Следует заметить, что в большинстве современных 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 для моделирования статистики ТС.

Для моделирования динамики ТС в условиях ЧСПХ ТС дискретизируется на более мелкие 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 . Декомпозиция подпространства X Евклидова пространства с помощью ячеек является топологическим пространством:

$$T_C = (X, \text{Def}(C)), \quad (5)$$

наложенным на топологическое пространство геотаксонов $T_{G_X}^{A_S}$. 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 – «возможных миров» W_D . Например, в простейшем случае в качестве последовательности возможных миров можно выделить следующие:

- 1) состояние покоя (состояние ячейки, еще не охваченной ЧСПХ) – w_{D0} ;
- 2) активное состояние (состояние ячейки, охваченной ЧСПХ, значения динамических параметров изменяются во времени) – w_{D1} ;
- 3) поврежденное (измененное) состояние покоя (состояние ячейки, подвергшейся влиянию ЧСПХ) – w_{D2} .

В общем случае возможных миров можно выделить неограниченное количество. Пусть множество возможных миров представляет собой множество $W_D = \{w_{D0}, w_{D1}, \dots, w_{Dn}\}$, где n – количество возможных миров. Выделим особый мир w_{D0} из множества возможных, который предполагает, что ячейка находится в состоянии покоя, то есть еще не охвачена ЧСПХ.

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 которых 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 .

$$W = W_S \times W_D.$$

По аналогии с отношением неразличимости во множестве точек пространства X , во множестве ячеек также

можно построить отношения A_i -неразличимости для любого подмножества атрибутов $A_i \subseteq A$.

Определим отношение A_i -неразличимости во множестве ячеек C :

$$(\forall A_i \subseteq A) \mathfrak{R}_C^{A_i} = \{(c_m, c_n) \in C \times C \mid \forall a \in A_i, f(c_m, a) = f(c_n, a)\}.$$

Обозначим $\mathfrak{R}_C^{A_i}(c)$ класс эквивалентности во множестве ячеек, порожденный отношением A_i -неразличимости, которому принадлежит ячейка c . Все ячейки, принадлежащие одному классу эквивалентности из множества классов эквивалентности, порожденных отношением A_i -неразличимости, имеют одинаковые значения атрибутов из подмножества $A_i \subseteq A$:

$$\begin{aligned} (\forall A_i \subseteq A)(\forall a \in A_i)(\forall c_m, c_n \in C) & \left[\mathfrak{R}_C^{A_i}(c_m) = \right. \\ & \left. = \mathfrak{R}_C^{A_i}(c_n) \right] \Leftrightarrow f(c_m, a) = f(c_n, a). \end{aligned}$$

Отношение A_i -неразличимости порождает топологическое пространство:

$$T_C^{A_i} = (C, Def(apr_C^{A_i})), \quad (6)$$

где $Def(apr_C^{A_i})$ – пространство аппроксимации во множестве ячеек; $apr_C^{A_i} = (C, \mathfrak{R}_C^{A_i})$ – семейство всех составных множеств пространства аппроксимации во множестве ячеек, включая пустое множество \emptyset .

Особый интерес представляют отношения A_s -неразличимости, w_D -неразличимости и $(A_s \cup w_D)$ -неразличимости во множестве ячеек. Отношение A_s -неразличимости во множестве ячеек $c \in C$ порождает статические классы эквивалентности, компонентами связности которого являются множества ячеек, аппроксимирующих геотаксоны. Пусть $G_C^{A_s}$ – множество геотаксонов, аппроксимируемых ячейками, $(G_C^{A_s})_i$ – множество геотаксонов, аппроксимируемых ячейками, которые принадлежат i -му классу эквивалентности, порожденному отношением A_s -неразличимости во множестве ячеек.

Пусть $Def(G_C^{A_s})$ – семейство всех составных множеств, полученных из множества геотаксонов $G_C^{A_s}$, аппроксимируемых ячейками, включая пустое множество \emptyset .

Пусть $Def(G_C^{A_s})$ – семейство всех составных множеств, полученных из множества геотаксонов $G_C^{A_s}$, аппроксимируемых ячейками, включая пустое множество \emptyset .

Определение. Декомпозиция подпространства аппроксимации C пространства X с помощью геотаксонов, аппроксимированных ячейками, является топологическим пространством

$$T_{G_C}^{A_s} = (C, Def(G_C^{A_s})), \quad (7)$$

наложенным на топологическое пространство $T_C^{A_s}$.

Отношение w_D -неразличимости во множестве ячеек порождает динамические классы эквивалентности. На их основе строится динамическое топологическое пространство $T_C^{w_D}$, динамика которого определяется поведением ЧСПХ.

Отношение $(A_s \cup w_D)$ -неразличимости также порождает динамические классы эквивалентности. На их основе формируется топологическое пространство, которое формируется в результате наложения двух топологических пространств: $T_C^{A_s}$ и $T_C^{w_D}$. Таким образом, для любой ячейки c , находящейся в условиях ЧСПХ, то есть обладающей динамическими параметрами из подмножества A_D , верно равенство:

$$(\forall c \in C) \mathfrak{R}_C^{A_s \cup w_D}(c) = \mathfrak{R}_C^{A_s}(c) \cap \mathfrak{R}_C^{w_D}(c).$$

В табл. 1 отображены свойства рассмотренных топологических пространств.

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 раз-

Таблица 1 – Топологические пространства

Топологическое пространство	Основа формирования	Свойства
Геотаксоны	Отношение A_s -неразличимости	Статическое (в смысле неизменных значений атрибутов), статическое (в смысле неподвижное в пространстве), элементы каждого класса эквивалентности однородны в смысле множества атрибутов A_s
Ячейки	Дискретизация пространства	Динамическое (в смысле изменяющихся во времени значений атрибутов), статическое (в смысле неподвижности в пространстве), элементы каждого класса эквивалентности однородны в смысле множества атрибутов $A_s \cup w_D$
ЧСПХ	Отношение w_D -неразличимости	Динамическое (в смысле изменяющихся во времени значений атрибутов), динамическое (в смысле изменяющееся в пространстве), элементы каждого класса эквивалентности однородны в смысле множества атрибутов w_D

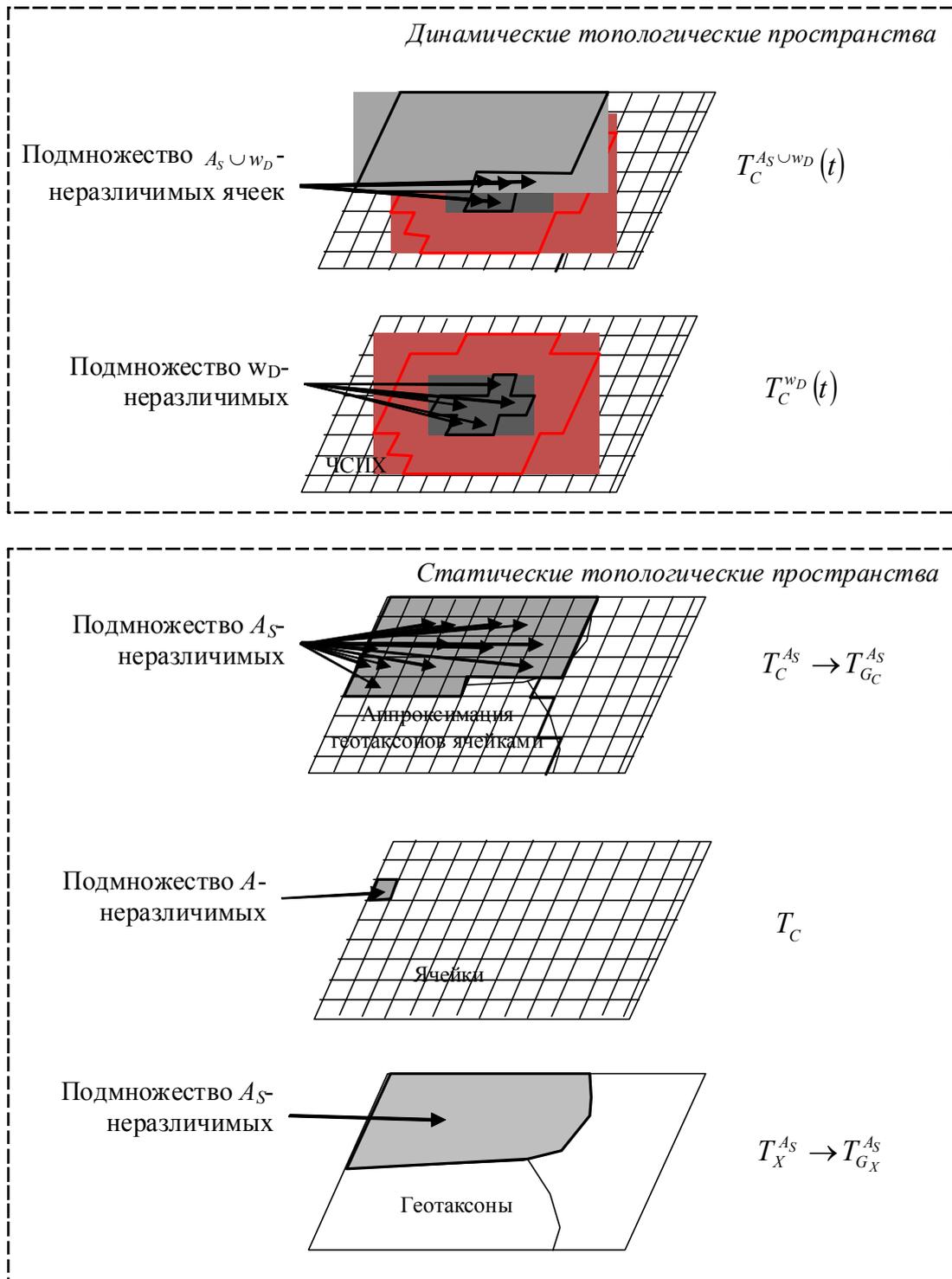


Рисунок 3 – Наложение топологических пространств

биение 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.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

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

Разработанная модель ТС была использована для формирования электронной карты Цюрупинского лесного хозяйства Херсонской области, сформированной путем наложения топологических пространств геотаксонов и ячеек. Топологическое пространство геотаксонов было сформировано на основе выделов лесного хозяйства (однородные участки местности). БД, описывающая геотаксоны, реализована с помощью СУБД PostgreSQL и содержит пространственные атрибуты, описывающие форму (в виде полигона) и местоположение геотаксона, а также набор привязанных к геотаксону статических атрибутов A_E , содержащий такие атрибуты, как тип участка (участок леса, пески, водосточник, биополяна,...), рельеф. Участок леса дополнительно содержит такие атрибуты, как тип леса, высота деревьев, возраст, класс бонитета, степень сомкнутости, ширина между рядами деревьев, расстояние между деревьями в ряду. Динамика ЧСПХ была описана с помощью модели распространения пожара Жариковой [1]. Для моделирования динамики ячейки был выделен набор возможных миров W_D : пассивное состояние, нагрев до состояния горения, горение, состояние после горения. Были также выделены параметры окружающей среды A_E : ско-

рость и направление ветра, влажность воздуха, температура воздуха, температура точки росы. На основании выделенных параметров с помощью модели [1] было построено динамическое топологическое пространство ячеек, находящихся в различных возможных мирах, которое является моделью ЧСПХ.

С помощью созданного программного обеспечения были произведены эксперименты для оценки быстродействия СППР и погрешности аппроксимации контура ЧСПХ по сравнению с существующими векторной моделью Финни и векторно-растровой моделью Труфино. В ходе эксперимента также исследовалось влияние размера ячейки на время расчета области, занятой пожаром. Для проведения расчетов было выбрано Цюрупинское лесное хозяйство Херсонской области.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 4 представлена карта Цюрупинского лесничества Херсонской области, 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.

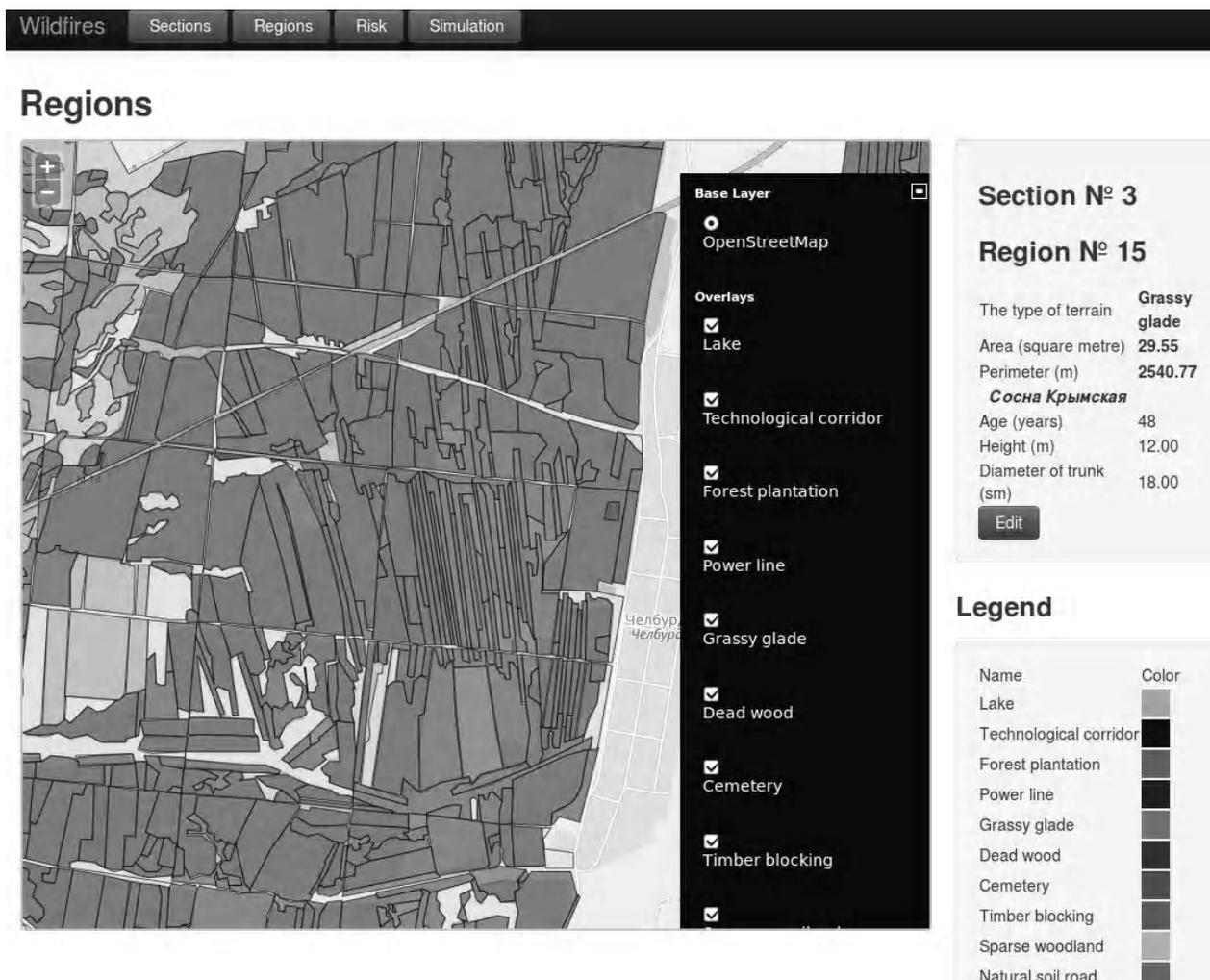


Рисунок 4 – Представление совокупности геотаксонов Цюрупинского лесничества в программе Disaster Risk Management

Для оценки быстродействия были выполнены эксперименты с использованием модели распространения пожара [1]. 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. 2. Параллельно были проведены такие же эксперименты с использованием векторно-растровой модели Труфино и векторной модели Финни.

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты эксперимента позволили сделать следующие выводы. Среди трех сравниваемых моделей самой эффективной с точки зрения вычислительной сложности оказалась предложенная автором, самой неэффективной – векторная модель Финни. В то же время модель Финни оказалась самой точной. На втором месте по точности находится модель Труфино. Учитывая то, что задача заключается в ППР в условиях ЧСПХ, быстродействие является более важным фактором, чем точность. Следовательно, можно сделать вывод, что предложенная модель подходит для решения поставленной задачи.

Анализ быстродействия и точности предложенного метода в зависимости от величины ячейки позволил сделать следующие выводы. Дискретизация пространства рассмотренной 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, предложенная модель ЧСПХ может обеспечить приемлемые характеристики по точности и быстродействию при дискретизации пространства (местности) с размерами ячеек от 8 м до 18 м.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований разработана модель территориальной системы в условиях ЧСПХ в виде динамического нечеткого топологического пространства, основанного на разбиении пространства на конечное множество непересекающихся однородных участков – геотаксонов, и последующей их дискретизации координатной сеткой равновеликих ячеек. Динами-

ка распространения чрезвычайной ситуации отражается в виде динамического нечеткого топологического пространства во множестве ячеек.

Научная новизна исследований заключается в следующем:

1) впервые разработана концепция представления ТС в условиях ЧСПХ в виде наложения статических и динамических топологических пространств, порожденных отношением неразличимости, каждое из которых позволяет представлять географическую и атрибутивную информацию о природных условиях, о ценных объектах, требующих защиты от ЧСПХ, а также о динамике ЧСПХ.

2) впервые разработана формальная модель динамики ЧСПХ в виде нечеткого динамического топологического пространства, в которой, в отличие от существующих моделей, динамика ЧСПХ представлена в виде движения граничной области нечетко-приближенного множества, что позволило снизить вычислительную сложность и обеспечить приспособление к условиям неполной и неточной информации.

Практическая значимость полученных результатов заключается в том, что разработано программное обеспечение, реализующее предложенный метод, на основе которого решена практическая задача поддержки принятия решений в условиях ЧСПХ для использования в СППР по противодействию ЧСПХ, основанных на геоинформационных системах.

Перспективы дальнейших исследований состоят в том, чтобы на основе предложенной модели построить модель оценки риска для ценных объектов, находящихся под воздействием ЧСПХ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование проводится в рамках государственной научно-исследовательской работы Херсонского национального технического университета №0113U007939 «Разработка теоретических и методологических основ формирования системы управления лесными ресурсами региона».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Граб М. В. Модели, методы и алгоритмы распространения лесных пожаров: дисс. ... канд. техн. наук: 01.05.02 / Граб Марина Витальевна. – Харьков : ХНУРЭ, 2004. – 230 с.
2. Martinez J. Human-caused wildfire risk rating for prevention planning in Spain / J. Martinez, C. Vega-Garcia, E. Chuvieco // Journal of Environmental Management. – 2009. – № 90. – P. 1241–1252.

Таблица 2 – Результаты эксперимента

№ п/п	Размер ячейки δ , м	Предложенная модель		Модель Труфино		Модель Финни	
		Время вычислений, мин	Погрешность аппроксимации, %	Время вычислений, мин	Погрешность аппроксимации, %	Время вычислений, мин	Погрешность аппроксимации, %
1	22	1	45,5	2,1	31,3	21,5	5,9
2	20	1,1	34	2,3	28,9		
3	18	1,2	25	2,5	21,9		
4	16	1,6	20,5	7,8	18,7		
5	14	1,9	15	7,8	12,4		
6	12	1,9	13,5	8,1	11,2		
7	10	3,1	11	8,2	8,9		
8	8	3,9	9,5	9,1	6,5		
9	6	6,2	8	13,1	5,9		
10	4	11	7,5	16,7	5,8		

3. Implementation of quantitative bushfire risk analysis in a GIS environment / [D. Atkinson, M. Chladil, V. Janssen et al.] // International Journal of Wildland Fire. – 2010. – № 19. – P. 649–658.
4. Chuvieco E. Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and geographic information system technologies / E. Chuvieco et al. // Ecological Modelling. – 2010. – № 221. – P. 46–58.
5. Preisler H. K. Probability based models for estimating wildfire risk / H. K. Preisler, D. R. Brillinger, R. E. Burgan et al. // International Journal of Wildland Fire. – 2004. – № 13. – P. 133–142.
6. Spatiotemporal analysis of wildfire ignitions in the St Johns River Water Management District, Florida / [M.G. Genton, D. T. Butry, M. L. Prestemon et al.] // International Journal of Wildland Fire. – 2006. – № 15. – P. 87–97.
7. Baranovskiy N. A web-oriented geoinformation system for forest fire danger prediction in typical forests of the Ukraine / N. Baranovskiy, M. Zharikova // Thematic cartography for the society. – Springer, 2014. – P. 13–22. – (Lecture notes in geoinformation and cartography).
8. Zharikova M. Threat assessment method for intelligent disaster decision support system / M. Zharikova, V. Sherstjuk // Advances in Int. Systems and Computing. – Springer, 2016. – Vol. 512. – P. 81–99.
9. Жарикова М. В. Разработка модели чрезвычайной ситуации природного характера в системе поддержки принятия решений / М. В. Жарикова, В. Г. Шерстюк // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2015. – 1/4(73). – P. 62–74.
10. An improved cellular automata for wildfire spread / T. Ghisy, B. Arca, G. Pellizaro et al. // Procedia Computer Science: ICCS 2015 International Conference On Computational Science, Reykjavik, Iceland, 1–3 June 2015: proceedings. – Elsevier: Volume 51, 2015. – P. 2287–2296.
11. Modeling the spread of grass fires / [D. H. Anderson, E. Catchpole, De Meste N. J. et al.] // The J. Of the Australian Mathematical Society Series B Applied Mathematics. – 1982. – № 23(4). – P. 451–466.
12. Fire area simulator-model development and evaluation: technical report: RMRS-RP-4 / M. A. Finney / USDA, UT. – Ogden, 2004. – 50 p.
13. A level-set algorithm for simulating wildfire spread / [T. Ghisu, B. Arca, G. Pellizzaro et al.] // CMES Computer Modeling in Engineering & Sciences. – 2014. – № 102(1). – P. 83–102.
14. A new algorithm for simulating wildfire through cellular automata / [G. A. Trufino, D. D. Ambrosio, R. Rongo et al.] // ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation. – 2011. – № 22(1). – P. 1–26.
15. Zharikova M. The plausible wildfire model in geoinformation decision support system for wildfire response / M. Zharikova, V. Sherstjik, N. Baranovskiy // Water resources, Forest, marine and ocean ecosystems: 15th international conference SGEM, 18–24 June 2015: proceedings. – Albena, Bulgaria: DOI: 10.5593/sgem2015B32, 2015. – P. 575–583.
16. Zharikova M. Development of the model of natural emergencies in decision support system / M. Zharikova, V. Sherstjik // Eastern European Journal of Enterprise Technologies. – 2015. – Vol 1, № 4(73). – P. 62–69.
17. Slowinski R. Rough set and rule-based multicriteria decision aiding / R. Slowinski, G. Salvatore, M. Benedetto // Pesquisa operacional. – 2012. – Vol. 32(2). – P. 213–269.
18. Pawlak Z. Rough Sets / Z. Pawlak, W. Jerzy, R. Slowinski et al. / Comm. of ACM. – 1995. – Vol.38, № 11. – P. 88–95.
19. Pawlak Z. Vagueness – a Rough Set View / Z. Pawlak // Structures in Logic and Computer Science. – 1997. – P. 106–117.
20. Abd El-Monsef M. E. On relationships between revised rough fuzzy approximation operators and fuzzy topological spaces / M. E. Abd El-Monsef, M. A. El-Cayar, R.M. Aqeel // International Journal of Granular Computing, Rough Sets and Intelligent Systems. – 2014. – Volume 3, № 4. – P. 257–269.

Статья поступила в редакцию 30.11.2016.

После доработки 25.12.2016.

Жарікова М. В.

Канд. техн. наук, доцент кафедри інформаційних технологій Херсонського національного технічного університету, Херсон, Україна
МОДЕЛЬ ТЕРИТОРІАЛЬНОЇ СИСТЕМИ В УМОВАХ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ПРИРОДНОГО ХАРАКТЕРУ

Актуальність. У статті розглядається динамічна просторова модель територіальної системи в умовах надзвичайних ситуацій природного характеру, що призначена для вирішення задач підтримки прийняття рішень і представляє собою модель складної динамічної системи. Аналіз літературних джерел показав, що застосування усталених підходів для розглянутого класу складних динамічних систем не забезпечує необхідної швидкодії та необхідної ефективності систем підтримки прийняття рішень. Це обумовлює актуальність подальшого пошуку нетрадиційних моделей і методів підтримки прийняття рішень, здатних забезпечити виконання пропонуваного до подібних систем вимог щодо швидкодії та ефективності.

Мета. Метою дослідження є зменшення збитків від надзвичайних ситуацій природного характеру за рахунок підвищення якості та своєчасності прогнозування динаміки територіальних систем в умовах надзвичайних ситуацій природного характеру.

Метод. Концепція територіальної системи в умовах надзвичайних ситуацій природного характеру представлена у вигляді накладення статичних і динамічних топологічних просторів, породжених відношенням нерозрізненості, кожний з яких дозволяє представляти географічну і атрибутивну інформацію про природні умови, про цінні об'єкти, які потребують захисту, а також про динаміку надзвичайних ситуацій природного характеру. Модель динаміки надзвичайних ситуацій природного характеру побудована на основі дискретизації простору сіткою рівновеликих квадратних комірок і представлена у вигляді нечіткого динамічного топологічного простору в множині комірок.

Результати. На основі розробленої концепції і моделі створена географічна веб-орієнтована система підтримки прийняття рішень. Були проведені експерименти, які показали, що запропонована модель надзвичайних ситуацій природного характеру може забезпечити необхідні характеристики щодо точності і швидкодії за умови дискретизації простору (місцевості) з розмірами комірок від 8 м до 18 м.

Висновки. Вперше розроблена концепція представлення територіальних систем в умовах надзвичайних ситуацій природного характеру у вигляді накладення статичних і динамічних топологічних просторів. Вперше розроблена формальна модель динаміки надзвичайних ситуацій природного характеру у вигляді руху граничної області нечітко-наближеної множини, що дозволило знизити обчислювальну складність і забезпечити пристосування до умов неповної та неточної інформації. Розроблено програмне забезпечення, що реалізує запропоновану концепцію і метод, на основі якого вирішена практична задача підтримки прийняття рішень в умовах надзвичайних ситуацій природного характеру.

Ключові слова: територіальна система, відношення нерозрізненості, топологічний простір, клас еквівалентності, геотаксон, надзвичайна ситуація природного характеру.

Zharikova M.

Ph.D., Associate Professor of Information Technologies Department, Kherson National Technical University, Kherson, Ukraine

THE MODEL OF TERRITORIAL SYSTEM IN NATURAL DISASTER CONDITIONS

Context. The spatial model of territorial system in natural emergency conditions dedicated to decision support tasks solving and represented as the model of complex dynamic system is described in the paper. The literature data analysis has shown that applying the established approaches to the class of complex dynamic systems under consideration doesn't provide the required calculation speed and efficiency of decision support system. This determines the timeliness of the further searching of nontraditional models and methods of decision support, which provide the fulfillment of calculation speed and efficiency requirements applicable to such systems.

Objective. The goal of research is decreasing the damage from the natural emergency by means of improving the quality and timelessness of forecasting the territorial system dynamics in the natural emergency conditions

Method. The concept of territorial system in natural emergency conditions is represented in the form of overlaying static and dynamic topological spaces induced by indiscernibility relation, each of which allows representing geographical and attributive information about nature conditions, value objects demanding protection against natural emergency, as well as about natural emergency dynamics. The model of natural emergency dynamics is based on the discretization of the space by the grid of square cells of equal area and represented in the form of fuzzy dynamic topological space in the set of cells.

Results. The web-oriented decision support system is created on the base of developed concept and model. The experiments have been conducted, which have shown that the proposed natural emergency model can provide reasonable characteristics in terms of accuracy and speed providing that the space is discretized with the size of cell being from 8 m to 18 m.

Conclusions. The concept of territorial system representation in the natural emergency conditions is first developed in the form of overlaying static and dynamic topological spaces. The formal model of the natural emergency dynamics in the form of moving the bounding region of fuzzy-rough set, which has allowed reducing computational complexity and provided adaptation to the conditions of incomplete and inaccurate information is first created. The software for realization of suggested concept and method is developed. The software has allowed performing the practical task of decision support in natural emergency conditions.

Keywords: territorial system, indiscernibility relation, topological space, equivalence class, geotaxon, natural emergency.

REFERENCES

1. Grab M. V. Modeli, metody i algoritmy rasprostraneniya lesnyh pozharov: Diss. kand. tehn. nauk: 01.05.02. Har'kov, HNURJe, 2004, 230 p.
2. Martinez J., Vega-Garcia C., Chuvieco E. Human-caused wildfire risk rating for prevention planning in Spain, *Journal of Environmental Management*, 2009, No. 90, pp. 1241–1252.
3. Atkinson D., Chladil M., Janssen V. et al. Implementation of quantitative bushfire risk analysis in a GIS environment, *International Journal of Wildland Fire*, 2010, No. 19, pp. 649–658.
4. Chuvieco E. et al. Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and geographic information system technologies, *Ecological Modelling*, 2010, No. 221, pp. 46–58.
5. Preisler H. K., Brillinger D. R., Burgan R. E. et al. Probability based models for estimating wildfire risk, *International Journal of Wildland Fire*, 2004, No. 13, pp. 133–142.
6. Genton M. G., Butry D. T., Prestemon M. L. et al. Spatiotemporal analysis of wildfire ignitions in the St Johns River Water Management District, Florida, *International Journal of Wildland Fire*, 2006, No. 15, pp. 87–97.
7. Baranovskiy N., Zharikova M. A web-oriented geoinformation system for forest fire danger prediction in typical forests of the Ukraine, *Thematic cartography for the society. Lecture notes in geoinformation and cartography*, Springer, 2014, pp. 13–22
8. Zharikova M., Sherstjuk V. Threat assessment method for intelligent disaster decision support system, *Advances in Int. Systems and Computing*. Springer, 2016, Vol. 512, pp. 81–99.
9. Zharikova M. V., Sherstjuk V. G. Razrabotka modeli chrezvychnoy situacii prirodnoho haraktera v sisteme podderzhki prinjatija reshenij, *Vostochno-evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij*, 2015, No. 1/4(73), pp. 62–74.
10. Ghisu T., Arca B., Pellizzaro G. et al. An improved cellular automata for wildfire spread, *Procedia Computer Science: ICCS 2015 International Conference On Computational Science*, Reykjavik, Iceland, 1–3 June 2015 : proceedings. Elsevier, Volume 51, 2015, pp. 2287–2296.
11. Anderson D. H., Catchpole E., De Meste N. J. et al. Modeling the spread of grass fires, *The J. Of the Australian Mathematical Society Series B Applied Mathematics*, 1082, No. 23(4), pp. 451–466.
12. Finney M. A. Fire area simulator-model development and evaluation: technical report : RMRS-RP-4. USDA, UT, Ogden, 2004, 50 p.
13. Ghisu T., Arca B., Pellizzaro G. et al. A level-set algorithm for simulating wildfire spread, *CMES Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 2014, No. 102(1), pp. 83–102.
14. Trufino G. A., Ambrosio D. D., Rongo R. et al. A new algorithm for simulating wildfire through cellular automata, *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, 2011, No. 22(1), pp. 1–26.
15. Zharikova M., Sherstjuk V., Baranovskiy N. The plausible wildfire model in geoinformation decision support system for wildfire response, *Water resources, Forest, marine and ocean ecosystems: 15th international conference SGEM, 18–24 June 2015: proceedings*. Albena, Bulgaria, 2015, pp. 575–583. DOI: 10.5593/sgem2015B32,
16. Zharikova M., Sherstjuk V. Development of the model of natural emergencies in decision support system, *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 2015, Vol 1, No. 4(73), pp. 62–69.
17. Slowinski R. Salvatore G., Benedetto M. Rough set and rule-based multicriteria decision aiding, *Pesquisa operacional*, 2012, Vol. 32(2), pp. 213–269.
18. Pawlak Z. Rough Sets, Jerzy W., Slowinski R. et al., *Comm. of ACM*, 1995, Vol. 38, No. 11, pp. 88–95.
19. Pawlak Z. Vagueness – a Rough Set View, *Structures in Logic and Computer Science*, 1997, pp. 106–117.
20. Abd El-Monsef M. E., El-Cayar M. A., Aqeel R. M. On relationships between revised rough fuzzy approximation operators and fuzzy topological spaces, *International Journal of Granular Computing, Rough Sets and Intelligent Systems*, 2014, Volume 3, No. 4, pp. 257–269.