

*Розглянуто питання формалізації правдоподібної моделі надзвичайної ситуації природного характеру в системі підтримки прийняття рішень на основі геоінформаційної системи. Запропоновано механізм декомпозиції місцевості на кінцеву множину непересічних однорідних ділянок і подальшої їх дискретизації координатною сіткою рівновеликих клітинок. Динаміка поширення надзвичайної ситуації моделюється рухом у часі розмитих меж її контуру, що представлені як гранична область наближеної множини*

*Ключові слова: надзвичайна ситуація, територіальна система, розповсюдження контуру, наближені межі контуру, джерело*

*Рассмотрены вопросы формализации правдоподобной модели чрезвычайной ситуации природного характера в системе поддержки принятия решений на основе геоинформационной системы. Предложен механизм декомпозиции местности на конечное множество непересекающихся однородных участков и последующей их дискретизации координатной сеткой равновеликих ячеек. Динамика распространения чрезвычайной ситуации моделируется движением во времени размытых границ контура, представленных граничной областью приближенно-го множества*

*Ключевые слова: чрезвычайная ситуация, территорияльная система, распространение контура, приближенные границы контура, источник*

УДК 004.986

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.37801

# РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ ПРИРОДНОГО ХАРАКТЕРА В СИСТЕМЕ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

**М. В. Жарикова**

Кандидат технических наук, доцент\*

E-mail: marina.jarikova@gmail.com

**В. Г. Шерстюк**

Доктор технических наук, профессор\*

E-mail: v\_sherstyuk@bigmir.net

\*Кафедра информационных технологий  
Херсонский национальный  
технический университет  
Бериславское шоссе, 24,  
г. Херсон, Украина, 73008

## 1. Введение

Чрезвычайные происшествия природного характера (ЧСПХ) несут значительные угрозы человеку и обществу. Так, число пострадавших от ЧСПХ увеличивается ежегодно на 8,6%, а экономические потери растут в среднем на 6% в год. Соответственно, защита населения и территорий от ЧСПХ является актуальной научно-практической проблемой.

При возникновении ЧСПХ требуется принимать меры по их локализации и ликвидации, обеспечивая минимизацию причиняемого ущерба. Поскольку ЧСПХ являются результатом одновременного воздействия значительного числа факторов, имеющих стохастическую природу, а развивающиеся при возникновении ЧСПХ процессы нелинейны, нестационарны и быстротечны, принимать меры противодействия им весьма непросто [1]. Неточность, неполнота и противоречивость исходной информации, территориальная распределенность событий, а также значительный дефицит времени и высокая ответственность затрудняют принятие решений, что стимулирует разработку систем поддержки принятия решений (СППР) по противодействию ЧСПХ. В то же время, несмотря на активные исследования, применение устоявшихся

подходов не обеспечивает требуемого быстродействия и приемлемой для данной предметной области эффективности СППР [2], что обуславливает актуальность дальнейшего поиска нетрадиционных моделей и методов поддержки принятия решений по противодействию ЧСПХ.

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Наиболее распространенным классом ЧСПХ являются пожары в природной среде, в первую очередь – лесные пожары. Соответственно, наиболее активным направлением исследований являются СППР, предметная область которых связана именно с лесными пожарами [3]. Принципиальной особенностью актуальных исследований данного класса систем является их тесная взаимосвязь с широким спектром геоинформационных систем (ГИС).

Анализ работ [4–6] показывает, что достаточно широкая аудитория исследователей ставила перед собой задачу прогнозирования ЧСПХ, решение которой предполагает применение различных методов статистического анализа для ретроспективных баз

данных. В то же время, неполная наблюдаемость происшествий (событий, связанных с возникновением ЧСПХ) и недостаточная точность измерения параметров внешней среды в различных точках пространства препятствуют получению достоверных прогнозов, что снижает ценность самостоятельного применения статистических подходов.

В работах [7–10] основное внимание уделяется получению для лиц, принимающих решения (ЛПР), определенных оценок, связанных с измерением степени риска либо опасности ситуации, и предназначенных для обоснования возможных (самостоятельных) решений ЛПР. Для повышения достоверности таких оценок зачастую используются модели распространения ЧСПХ различной сложности.

Одни из них [8, 9] используют детальные математические модели физико-химических процессов, протекающих при определенном состоянии внешней среды на однородных участках местности, и позволяют весьма точно определять границы контура ЧСПХ в заданные моменты времени. Недостатком использования таких моделей является их высокая вычислительная сложность, препятствующая достижению требуемого быстродействия СППР.

В других моделях [10] распространения ЧСПХ протекающие процессы в значительной мере упрощаются, что позволяет ускорить вычисления, но снижает их точность, вследствие чего снижается и убедительность оценки ситуации. Указанные недостатки существенно усугубляются в условиях значительной динамики состояния внешней среды [11].

По результатам анализа литературных источников можно сделать вывод о том, что требуемое для ЛПР быстродействие СППР может быть достигнуто, в частности, с помощью использования правдоподобной формальной модели ЧСПХ, которая должна носить *приближенный* характер. Вследствие этого границы контура ЧСПХ станут размытыми, что позволит значительно снизить требования к модели распространения ЧСПХ по точности без существенного ее упрощения и без потери наглядности и, соответственно, обоснованности оценок для ЛПР.

Нетрудно заметить, что в подавляющем большинстве работ используются главным образом статистические и математические методы. В то же время, построение приближенной модели ЧСПХ требует применения интеллектуальных методов, что диктуется неструктурированностью предметной области, причем традиционные подходы на основе формализмов нечетких множеств (*fuzzy set*), обладающей высокой вычислительной сложностью (при непрерывном интервале оценки  $[0,1]$ ), не могут обеспечить требуемые показатели быстродействия СППР [12]. Значительно меньшую вычислительную сложность имеют операции в формализмах, основанных на приближенных множествах (*rough set*) [13, 14]. Однако, исследования указанных формализмов с позиций их применения в СППР для решения задач противодействия ЧСПХ [15] практически не проводились, и соответствующие модели на сегодняшний день отсутствуют. Это обуславливает актуальность и необходимость дальнейших исследований в области построения моделей ЧСПХ на основе формализмов теории приближенных множеств.

### 3. Цель и задачи исследования

Проведенные в данной работе исследования имели целью построить формальную правдоподобную модель чрезвычайной ситуации природного характера, пригодную для решения задач поддержки принятия решений по противодействию таким ситуациям с использованием методов и механизмов теории приближенных множеств для выполнения заданных требований по быстродействию СППР.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- исследовать пространственную составляющую ЧСПХ и построить формальную модель территориальной системы;
- исследовать временную составляющую ЧСПХ и построить модель динамики ЧСПХ;
- формализовать правдоподобную модель ЧСПХ с размытыми границами контура, используя методы теории приближенных множеств.

### 4. Материалы и методы исследования модели ЧСПХ

ЧСПХ как объект исследования представляет собой сложную динамическую систему, развивающуюся в пространстве и времени. В ее модели будем учитывать пространственную и временную составляющие.

#### 4.1. Модель пространственной составляющей ЧСПХ

Местность, или территория, в пределах которой развивается ЧСПХ, представляет собой *территориальную систему* (ТС), которую обозначим  $\Xi$ . Возможности современных ГИС позволяют реализовать визуальную модель ТС, необходимую ЛПР для эффективного принятия решений и наглядно представляющую все аспекты пространственной составляющей ЧСПХ.

Зададим множество  $Y$  некоторой природы и алгебру  $\sigma_Y$  над ним.

Зададим множество значений времени  $T$ . Введем шкалу времени, задав отношение частичного порядка  $<_T$  и начальное значение времени  $t_0$ .

Введем в ТС  $\Xi$  линейное нормированное равномерное (Чебышевское) пространство  $C$  с нормой [16]:

$$\|y\|_c = \min_{t \in [0, T]} (y(t)), \tag{1}$$

где  $y \in Y$ ,  $t \in T$ , и зададим соответствующую норме  $\|y\|_c$  метрику  $\xi_c(y_1, y_2) = \|y_1 - y_2\|$ , такую что:

- а)  $\xi_c(y_1, y_2) = \|y_1 - y_2\| = 0 \Leftrightarrow y_1 = y_2$ ;
- б)  $\xi_c(y_1, y_2) = \|y_1 - y_2\| = \|y_2 - y_1\| = \xi_c(y_2, y_1)$ ;
- в)  $\xi_c(y_1, y_2) = \|y_1 - y_2\| = \|(y_1 - z) - (z - y_2)\| \leq \|y_1 - z\| + \|z - y_2\| = \xi_c(y_2, y_1)$ ;
- г)  $\xi_c(y_1, y_2) = \xi_c(y_1 + a, y_2 + a)$ ;
- д)  $\xi_c(\lambda y_1, \lambda y_2) = |\lambda| \cdot \xi_c(y_1, y_2)$ .

Пусть  $C$  – двумерное пространство, содержащее область рассмотрения.

Зададим в нем базис  $e_1, e_2$  так, чтобы метрика  $\xi_C$  оставалась равномерной, а разложение любого вектора  $v = \alpha_1 e_1 + \alpha_2 e_2$  давало координаты  $v(\alpha_1, \alpha_2)$  в пространстве  $C$  [16].

Декомпозицию ТС  $\Xi$  построим, исходя из следующих основных принципов:

а) разбиения пространственных областей на конечные множества непересекающихся объектов, представленных в виде геометрических фигур;

б) дискретной аппроксимации пространственной области на конечное множество равновеликих координатно-ориентированных элементов (сетку ячеек).

Основным структурным элементом ТС  $\Xi$ , а также и основным звеном в задаче пространственной привязки, представления и анализа информации о подверженности территориальной системы ЧСПХ, примем объект, обладающий следующими свойствами [17]:

1) привязки к координатам пространства  $C$ ;

2) наглядности (обозначенные участки местности, с которыми ЛПР привык иметь дело);

3) однородности (с точки зрения значений определенных атрибутов и природного риска);

4) сравнимости (описания объектов должны позволять осуществить их адекватное сравнение).

Очевидно, такой структурный элемент должен быть объективно существующим ограниченным участком местности, которому может быть приписан вектор параметров состояния, характеризующий его физико-технические параметры в привязке к географическим координатам (геоинформация). Кроме того, структурный элемент ТС должен являться цельным и однородным «объектом интереса» для ЛПР, в отношении которого как единого целого (независимо от иных способов разбиения пространства) ЛПР непосредственно решает задачу оценивания состояния (диагностики).

В качестве такого структурного элемента будем использовать понятие *геотаксона* – статического объекта, находящегося в пределах исследуемой пространственной области и представляющего собой участок данной пространственной области.

Пусть  $g$  – инвариантное подпространство пространства  $C$ ,  $g \subset C$ .

Пусть в  $g$  задана точка  $b$  со статическими (неизменными во времени) координатами  $(\alpha_x, \alpha_y)$ ,  $b = (\alpha_{bx}, \alpha_{by}) \in g$ .

Назовем точку  $b$  *реперной точкой* подпространства  $g$ .

Пусть всякой точке  $c = (\alpha_{cx}, \alpha_{cy})$  подпространства  $g$  путем наблюдения (измерения) могут быть сопоставлены значения параметров  $x_c^i$ , множество которых назовем *состоянием*  $X_c = \{x_c^i\}_{i=1}^m$ ,  $m$  – число параметров.

Пусть подпространство  $g$  содержит  $k$  точек:  $\forall k c_k \in g$ , каждая из которых обладает состоянием  $X_{c_k}$ . Тогда состояние подпространства  $g$  может быть описано как кортеж  $X_g = \langle X_{c_1}, \dots, X_{c_k} \rangle$  длины  $k$ .

**Определение 1.** Подпространство  $g$  пространства  $C$ , имеющее реперную точку  $b \in g$ , определяющую координаты  $g$  в  $C$ , и вектор состояния  $X_g = \langle X_{c_1}, \dots, X_{c_k} \rangle$ , называется *геотаксоном*, если все его точки  $c_k \in g$  имеют одинаковые значения определенного параметра  $x_c^i$  или подмножества параметров  $\{x_c^i, \dots, x_c^1, \dots, x_c^v\}$ :

$$\forall i, j \in [1, k] \forall e \in [1, m] x_{c_i}^e = x_{c_j}^e. \tag{2}$$

Таким образом, геотаксон рассматривается как однородное с точки зрения характеристик определенных параметров состояния подпространство  $g \subset C$  [17]. Поскольку свойство однородности в (2) может рассматриваться относительно различных наборов параметров состояния (вариантов), разбиение пространства  $C$  на геотаксоны для каждого такого варианта может быть различным. Более того, оператор равенства  $=$  в (2) 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 ГИС статистика ведется с привязкой к пронумерованым участкам местности, свойства которых вполне соответствуют определению 1, это позволяет рассматривать геотаксоны в ГИС как однородные пронумерованные участки местности.

Пусть всякий геотаксон  $g_i$  геометрически ограничен контуром  $K(g_i)$ , имеющим форму замкнутой ломаной линии ненулевой длины и, соответственно, имеет ненулевую площадь.

**Определение 2.** Геотаксоны  $g_i$  и  $g_j$ , контуры которых  $K(g_i)$  и  $K(g_j)$  имеют общие отрезки ненулевой длины,  $K(g_i) \cap K(g_j) \neq \emptyset$ , называются *смежными*.

В рамках территориальной системы (ТС)  $\Xi$  геотаксоны не могут перекрывать либо покрывать друг друга, но могут соприкасаться (быть смежными, примыкать друг к другу). Свойство смежности, позволяя определить примыкающие друг к другу геотаксоны, играет значительную роль для описания динамики ЧСПХ.

#### 4. 2. Модель временной составляющей ЧСПХ

Веденные выше структурные объекты ТС – геотаксоны – являются удобным инструментом «мгновенной» диагностики ситуации, поскольку дают возможность оценивать лесопожарные риски по состоянию в некоторый момент времени  $t$ .

Для моделирования динамики ЧСПХ территориальная система  $\Xi$ , включающая совокупность геотаксонов  $g_i \in G$ , дискретизируется с помощью сетки равновеликих координатно-ориентированных элементов (ячеек) квадратной формы (рис. 1), что позволяет осуществить переход от непрерывной формы представления геоинформации внутри геотаксона к дискретной – в масштабе отдельных ячеек.

Используя  $\xi_C$ , наложим с помощью линейного отображения  $f$  метрическую сеть координатных линий с  $\delta = \Delta\alpha_1 = \Delta\alpha_2$ , образующую множество  $D$  квадратных ячеек размером  $\delta \times \delta$ , на пространство  $C$  в начальной точке с координатами  $(\alpha_1 = 0, \alpha_2 = 0)$ :

$$f: D \rightarrow C. \tag{3}$$

Сопоставим каждой ячейке  $d_m \in D$  значения параметров  $x_{d_m}^i$ , множество которых назовем *состоянием*  $X_{d_m} = \{x_{d_m}^i\}_{i=0}^s$ ,  $s$  – число параметров.

Зададим для каждой ячейки  $d_m \in D$  признак  $x_{d_m}^0$ , такой что  $x_{d_m}^0 \in X_{d_m}$ , с двумя возможными значениями:

- «охвачена ЧСПХ» ( $x_{d_m}^0 = 1$ );
- «не охвачена ЧСПХ» ( $x_{d_m}^0 = 0$ ).

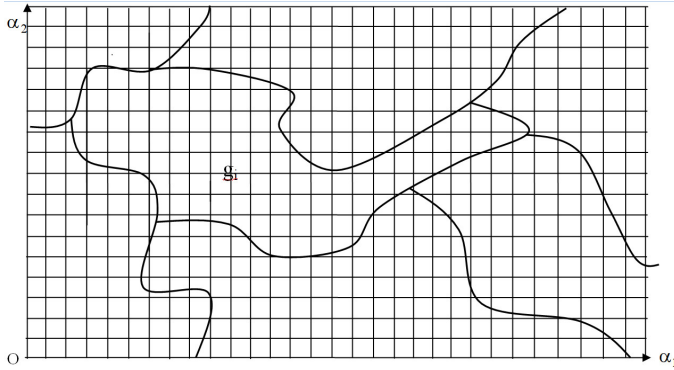


Рис. 1. Построение территориальной системы  $\Xi$

Построим на основании множества значений при-

знаков  $\{x_{d_m}^0\}_{m=1}^z$ ,  $z = |\{d_m\}|$  разбиение  $\partial_D(t)$  множества

ячеек  $\{d_m\}_{m=1}^z \in D$  в каждый момент времени  $t$  на два подмножества – охваченных ячеек  $D^+(t)$  и неохваченных ячеек  $D^-(t)$ ,  $D^+(t) \cup D^-(t) = D$ . Обратим внимание, что собственно множество ячеек  $D$  является статическим, а его разбиение  $\partial_D(t)$  – динамическим, что позволяет адекватно отобразить динамику ЧСПХ.

**Определение 3.** *Территориальной системой  $\Xi$*  называется область значений линейного отображения  $f$  множества ячеек  $D$  на множество геотаксонов  $G = \{g_j\}_{j=1}^r$  мощности  $r$  в пространстве  $S$ .

Таким образом, матрица ячеек  $D$  образует нижний слой ТС  $\Xi$ , в то время как совокупность геотаксонов  $G$  образует верхний слой ТС  $\Xi$ . Поскольку оба слоя совмещены в единой системе координат  $(\alpha_1, \alpha_2)$  (точнее – наложены друг на друга с совмещением точки отсчета координат  $(0,0)$ ), каждый геотаксон  $g_k \in G$  аппроксимируется множеством нижележащих яче-

ек  $\{d_{km}\}_{m=1}^z \in D$ , таких что  $\forall m \{d_{km}\} \in g_k$ , мощностью  $n_m = |\{d_{km}\}|$ .

### 4. 3. Модель чрезвычайной ситуации природного характера

Рассмотрим процессы формирования и развития ЧСПХ  $F$ .

Возникновение ЧСПХ связано с наличием определенного источника. Так в случае лесного пожара источник возникновения может иметь природный (молния), антропогенный (брошенный человеком окурок, искра от тепловоза) или иной характер. Источник возникновения играет существенную роль в рассматриваемой модели, поскольку является начальной точкой дальнейшего распространения ЧСПХ.

Введем понятие источника ЧСПХ. С учетом проведенной дискретизации ТС  $\Xi$  будем считать источник возникновения точечным и содержащимся в пределах некоторой ячейки  $d_1 \in D$ . Тогда ячейка  $d_1$  с некоторой вероятностью (возможностью)  $\mu_1$  может являться источником ЧСПХ.

**Определение 4.** *Источником  $u_1$  ЧСПХ  $F$*  с правдоподобностью  $\mu_1$  называется ячейка  $d_1$  ТС  $\Xi$ , внутри границ которой с вероятностью  $p \geq \mu_1$  физически локализован источник возникновения ЧСПХ.

Если известно, что  $u_1 = d_1 \in D^+(t)$ , то  $\mu_1 = 1$ .

В противном случае  $\mu_1$  обозначает оценку возможности начала процесса распространения ЧСПХ из ячейки  $d_1$ .

Следует заметить, что процесс распространения ЧСПХ  $F$  может происходить параллельно во времени от нескольких независимых (или зависимых) друг от друга источников, поэтому модель ЧСПХ должна включать множество таких источников.

Будем считать, что каждый источник  $u_1$  в процессе распространения ЧСПХ формирует очаг распространения  $F_1$ .

Таким образом, при дальнейшем рассмотрении ЧСПХ как сложной динамической системы будем учитывать следующие допущения:

1. ЧСПХ происходят исключительно в пределах ТС, представляемой матрицей квадратных ячеек  $D$  размером  $\delta \times \delta$ ;

2. ЧСПХ в общем случае имеет множество точечных источников  $\{u_l\}$ , полностью охватывающих ячейки ТС, в которой они расположены, и множество соответствующих очагов распространения  $\{F_l\}$ .

Очевидно, что  $F = \cup_{l=1}^{n_F} F_l$ , где  $n_F = |\{u_l\}|$  ЧСПХ  $F$  в момент времени  $t \in T$  определяется:

а) множеством источников  $U(t) = \{u_l\}$ , где  $l \in [1..n_F(t)]$  – индекс источника,  $n_F(t)$  – общее число источников в момент времени  $t$ ;

б) множеством охваченных ЧСПХ в момент времени  $t$  ячеек  $D^+(t)$ .

Предположим, что состояние  $X_F(t)$  ЧСПХ  $F$  в каждый момент времени  $t$  может быть адекватно описано множеством охваченных ячеек  $D^+(t)$ .

Обозначим как  $X_{F_1}(t)$  состояние в момент времени  $t \in T$  очага  $F_1$ , источник которого находится в ячейке  $d_1$ . Тогда  $X_F(t) = \cap_{l=1}^{n_F} X_{F_l}(t)$ .

**Определение 5.** *Чрезвычайная ситуация природного характера  $F$* , развертывающаяся во времени  $t \in T$  и на пространстве  $S$ , есть сложная динамическая система, имеющая состояние  $X_F(t)$  и включающая территориальную систему  $\Xi$  множество источников  $U(t) = \{u_l\}$ , и:

$$F = \langle C, T, \Xi, X_F(t), U(t), \chi \rangle, \tag{4}$$

где  $\chi$  – переходная функция, такая что

$$X_F(t+1) = \chi(X_F(t)).$$

Состояние внешней среды  $E$  для ЧСПХ  $F$  в момент времени  $t \in T$  может быть описано  $n_p$ -местным кортежем параметров  $X_E(t) = \langle x_E^1(t), \dots, x_E^{n_p}(t) \rangle$ , где  $n_p$  – число наблюдаемых параметров внешней среды, включая метеорологические, гидрогеологические параметры, антропогенные нагрузки, количество и расположение сил и средств для ликвидации ЧСПХ и т. д.

На рис. 2 представлена аппроксимация ЧСПХ  $F = \{F_{ij}\}$  с единственным очагом  $F_{ij}$ , источник которого расположен в ячейке  $d_{ij}$ .



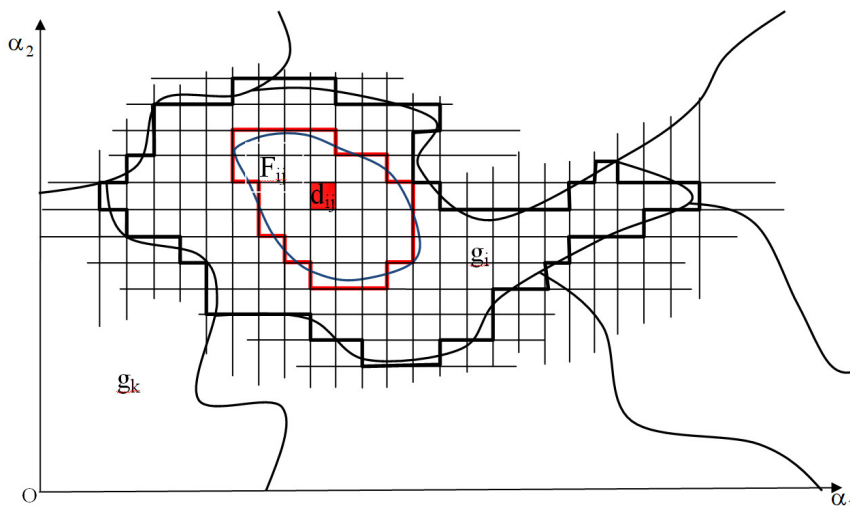


Рис. 2. Фрагмент чрезвычайной ситуации природного характера

Очевидно, что ЧСПХ  $F$  по аналогии с геотаксономии может быть аппроксимирована множеством охваченных ячеек координатной сетки  $D$ . Соответственно, двуслойная архитектура ТС  $\Xi$  дополняется третьим слоем, отражающим динамику ЧСПХ.

Распространение ЧСПХ может быть представлено движением границ ее контура.

Поскольку значительная вычислительная сложность реализации непрерывной переходной функции  $\chi$  в (4) препятствует обеспечению требуемого быстродействия СППР, движение границ контура ЧСПХ для ускорения вычислений необходимо дискретизировать, т.е. «размыть». Для осуществления дискретизации может быть использован формализм теории приближенных множеств (*rough set*) [13].

В соответствии с [14] зададим для универсума ячеек  $D$  отношение неразличимости  $IND_D \subseteq D \times D$ . Пусть задано некоторое множество  $IND \subset Y$ . Пусть также на основе  $\sigma_Y$  задана конечная функция  $f_D: D \times Y \rightarrow U$ , такая что  $f_D(d_i, y) \in u \quad \forall d_i \in D, \forall y \in Y, \forall u \in U$ .

**Определение 6.** Бинарное отношение неразличимости (эквивалентности)  $IND_D$  ячеек  $d_i, d_j \in D$  есть:

$$IND_D = \{(d_i, d_j) \in D \times D : \forall m \in IND \quad f_D(d_i, m) = f_D(d_j, m)\}, \quad (5)$$

где  $IND$  – множество признаков.

**Определение 7.** Две ячейки  $d_i \in D$  и  $d_j \in D$  неразличимы по  $IND_D$ , если и только если  $f_D(d_i, m) = f_D(d_j, m) \quad \forall m \in IND$  для каждого  $m \in IND$ .

На основе отношения  $IND_D$  могут быть выделены классы эквивалентности (категории) ячеек множества  $D$ , в которые включаются элементы, обладающие одинаковыми значениями классификационных признаков (атрибутов). Внутри каждой категории исходя из  $IND_D$  ячейки по своим свойствам считаются неразличимыми.

Соответственно, множество  $D$  может быть разделено на классы эквивалентности (кластеры)  $IND_D = \{D^+, D^-\}$ .

Используя отношение  $IND_D$ , можно построить приближенное множество ячеек  $\tilde{D}^+$ , которое характеризуется двумя аппроксимациями: *нижней*, опре-

деляющей ячейки, необходимо и однозначно принадлежащие множеству  $D^+$ , и *верхней*, определяющей ячейки, которые *возможно* принадлежат множеству  $D^+$ . В то же время, определение верхней аппроксимации позволяет исключить ячейки, однозначно не принадлежащие данному множеству (т. наз. негативная область).

Определим аппроксимации и граничную область множества  $\tilde{D}^+$  формально [13, 14].

$IND_D$  – *нижней аппроксимации* приближенного множества  $D^+$  является совокупность ячеек, которые на основе отношения  $IND_D$  могут быть классифицированы как принадлежащие  $D^+$ :

$$IND_D(D^+) = \cup_{d \in D} \{IND(d_i) : IND(d_i) \subseteq D^+\}. \quad (6)$$

$IND_D$  – *верхней аппроксимацией* приближенного множества  $D^+$  является совокупность ячеек, которые *возможно* принадлежат  $D^+$  на основе отношения  $IND_D$ :

$$\overline{IND_D}(D^+) = \cup_{d \in D} \{IND_D(d_i) : IND_D(d_i) \cap D^+ \neq \emptyset\}. \quad (7)$$

$IND_D$  – *граничная область*  $D^+$  состоит из подмножества ячеек, которые принадлежат  $IND_D$ -верхней аппроксимации, но не принадлежат  $IND_D$ -нижней аппроксимации:

$$BND_{IND_D}(D^+) = \overline{IND_D}(D^+) - IND_D(D^+). \quad (8)$$

$IND_D$  – *отрицательная область* приближенного множества  $D^+$  включает множество ячеек универсума  $D$ , которые достоверно не принадлежат  $D^+$  (то есть, однозначно принадлежат  $D^-$ ):

$$NEG_{IND_D}(D^+) = D - \overline{IND_D}(D^+) = D^-. \quad (9)$$

Состояние ЧСПХ представим в виде приближенного множества ячеек, охваченных пожаром [15, 16] (рис. 3).

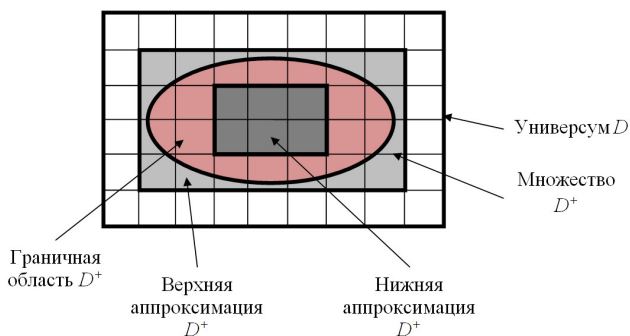


Рис. 3. Приближенное множество ячеек, охваченных ЧСПХ

$$\tilde{D}^+ = \langle \underline{\text{IND}}_R(D^+), \overline{\text{IND}}_R(D^+) \rangle. \tag{10}$$

Здесь множество  $\{d_i\}_{i=1}^n$  ячеек, для которых  $x_{d_i}^0 = 1$ , принадлежит нижней аппроксимации  $D^+$ :

$$\underline{\text{IND}}_D(D^+) = \{d_i\}_{i=1}^n, \tag{11}$$

в то время как верхняя аппроксимации  $D^+$  состоит из множества ячеек, принадлежащих нижней аппроксимации и граничной области, для которых:

$$\overline{\text{IND}}_D(D^+) = \underline{\text{IND}}_D(D^+) + \text{BND}_D(D^+). \tag{12}$$

Граничная область множества  $D^+$  образована подмножеством ячеек, которые пересекает контур ЧСПХ:

$$\text{BND}_{\text{IND}_D}(D^+) = \overline{\text{IND}}_D(D^+) - \underline{\text{IND}}_D(D^+). \tag{13}$$

Множество  $\{d_j\}_{j=1}^m$  ячеек, для которых  $x_{d_j}^0 = 0$ , составляет отрицательную область:

$$\text{NEG}_{\text{IND}_D}(D^+) = D - \overline{\text{IND}}_D(D^+) = D^- = \{d_j\}_{j=1}^m. \tag{14}$$

Таким образом, зная в некоторый момент времени  $t \in T$  состав множеств  $D$  и  $D^-(t)$ , из (14) можно определить  $\overline{\text{IND}}_D(t)$ , и, зная также состав множества  $D^+(t)$  – из (12) определить  $\text{BND}_D(t)$ .

Граничная область  $\text{BND}_D(t)$  представляет собой «размытый» дискретизированный на уровне ячеек координатной сетки  $D$  контур ЧСПХ  $F$ .

### 5. Результаты исследования точности и быстродействия модели

Представленная в данной работе модель 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.

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

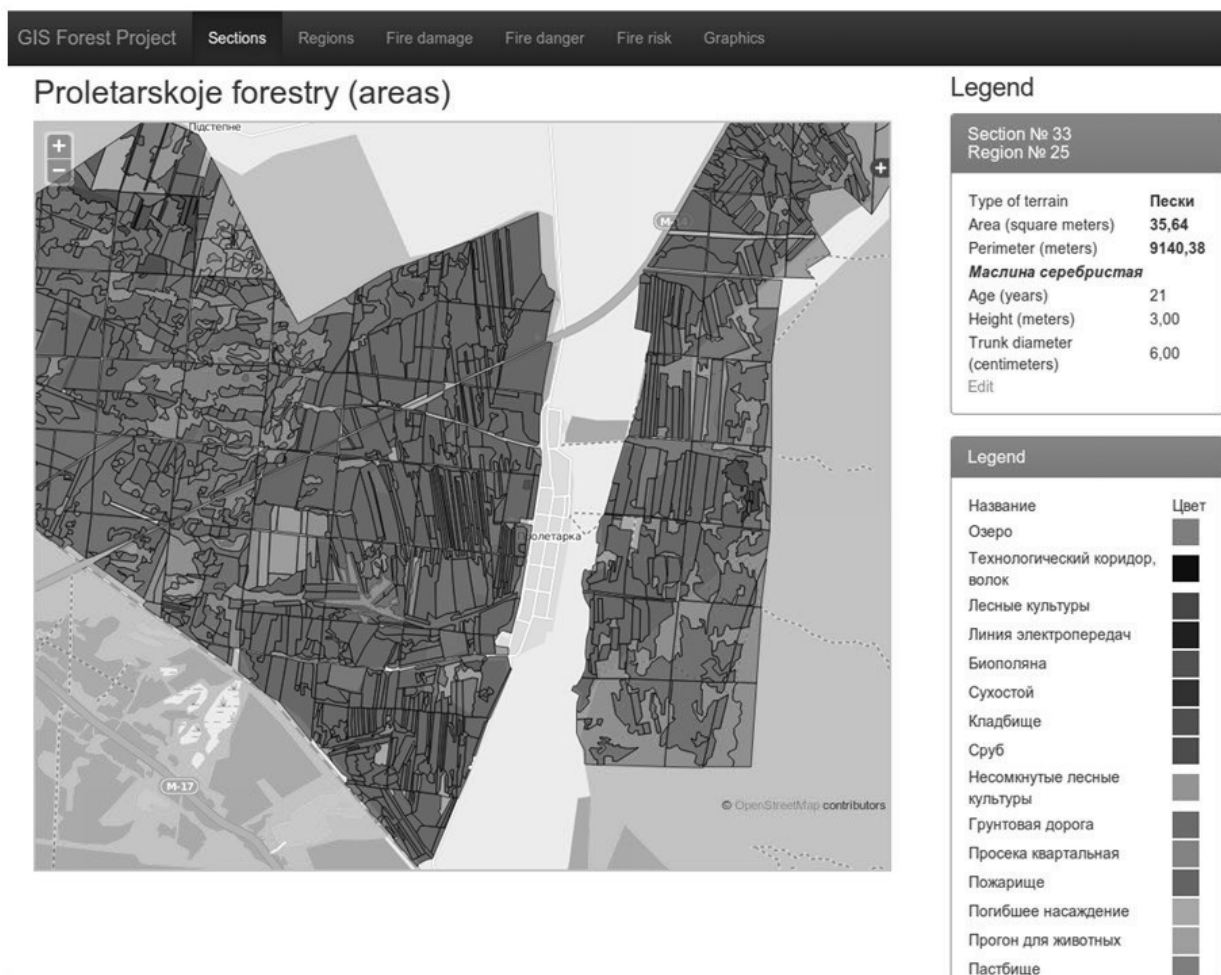


Рис. 4. Представление совокупности геотаксонов Цюрупинского лесничества в программе GIS Forest Project

Для оценки быстродействия СППР были выполнены эксперименты с использованием переходной функции, реализованной в виде модели распространения пожара [18].

В ходе эксперимента исследовалось влияние размера ячейки  $\delta$  на время вычисления оценки риска геотаксона и на точность аппроксимации границ контура пожара (табл. 1).

Таблица 1

Результаты эксперимента

№ п/п	Размер ячейки $\delta$ , м	Время расчета риска, мин	Погрешность аппроксимации, %
1	22	3,5	37,5
2	20	4,5	30
3	18	5	23,5
4	16	6	17,5
5	14	7,5	12
6	12	10	9
7	10	14	7
8	8	17,5	4,5
9	6	29	3
10	4	48	2,5

Время вычисления оценки риска (мин.)

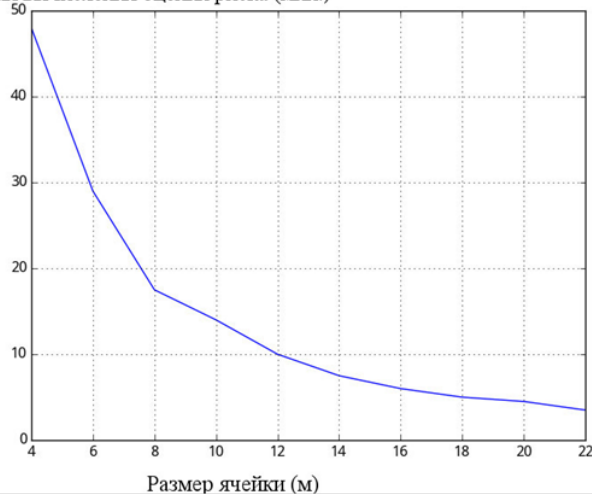


Рис. 5. График зависимости времени вычисления оценки риска от размера ячейки координатной сетки

В качестве геотаксона для проведения расчетов времени оценки риска был выбран 25-й выдел 33-го квартала Цюрупинского лесничества, характеризующийся сравнительно малыми размерами очагов возгорания (рис. 4). Результаты эксперимента для  $\delta \in [4..22]$  м представлены в табл. 1 и отображены в виде графиков (рис. 5, 6).

Погрешность аппроксимации (%)

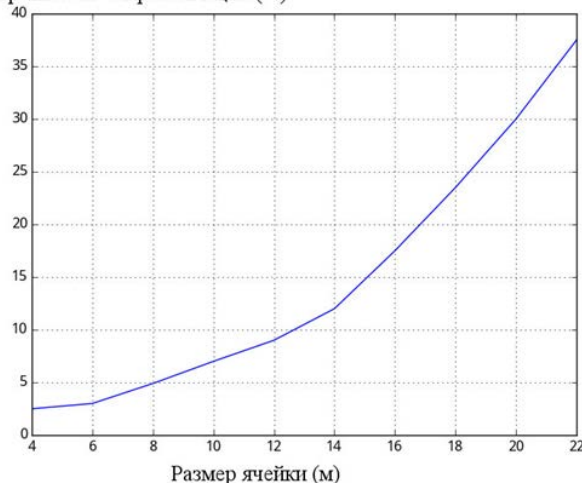


Рис. 6. График зависимости погрешности аппроксимации границ контура пожара от размера ячейки координатной сетки

### 6. Обсуждение результатов исследования точности и быстродействия модели

Результаты эксперимента позволяют сделать следующие выводы.

Дискретизация пространства рассмотрения координатной сеткой ячеек с размером менее 8 м приводит к резкому увеличению времени вычисления, а при размере ячеек от 14 м и выше 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 до 14 м.

### 7. Выводы

В результате проведенных исследований была рассмотрена пространственная составляющая ЧСПХ и построена формальная модель территориальной системы, основанная на разбиении пространства на конечное множество непересекающихся однородных участков – геотаксонов, и последующей их дискретизации координатной сеткой равновеликих ячеек.

Была исследована временная составляющая ЧСПХ и построена модель динамики ЧСПХ.

Разработана правдоподобная модель чрезвычайной ситуации природного характера, которая отражается движением во времени размытых с помощью методов теории приближенных множеств границ контура, представленных граничной областью приближенного множества.

Предложенная модель может быть использована в СППР по противодействию ЧСПХ, основанных на геоинформационных системах, и при дискретизации координатной сеткой ячеек размером от 8 до 14 м обеспечивает достаточные показатели СППР по точности и быстродействию.

## Литература

1. Miller, C. A review of recent advances in risk analysis for wildfire management [Text] / C. Miller, A. A. Ager // *International Journal of Wildland Fire*. – 2013. – Vol. 22, Issue 1. – P. 1–14. doi: 10.1071/wf11114
2. Loboda, T. Assessing the risk of ignition in the Russian Far East within a modeling framework of fire threat [Text] / T. Loboda, I. A. Kriszar // *Ecological Applications*. – 2007. – Vol. 17, Issue 3. – P. 791–805. doi: 10.1890/05-1476
3. Tolhurst, K. Phoenix: development and application of a bushfire risk management tool [Text] / K. Tolhurst, B. Shields, D. Chong // *The Australian Journal of Emergency Management*. – 2008. – Vol. 23, Issue 4. – P. 47–54.
4. 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, Issue 2. – P. 1241–1252. doi: 10.1016/j.jenvman.2008.07.005
5. Atkinson, D. Implementation of quantitative bushfire risk analysis in a GIS environment [Text] / D. Atkinson, M. Chladil, V. Jansen, A. Lucieer // *International Journal of Wildland Fire*. – 2010. – Vol. 19, Issue 5. – P. 649–658. doi: 10.1071/wf08185
6. Chuvieco, E. Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and geographic information system technologies [Text] / E. Chuvieco, I. Aguadoa, M. Yebraa et. al. // *Ecological Modelling*. – 2010. – Vol. 221, Issue 1. – P. 46–58. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2008.11.017
7. Prestemon, J. Understanding broadscale wildfire risks in a human-dominated landscape [Text] / J. P. Prestemon, J. M. Pye, D. T. Butry et. al. // *Forest Science*. – 2002. – Vol. 48. – P. 685–693.
8. Preisler, H. Probability based models for estimating wildfire risk [Text] / H. K. Preisler, D. R. Brillinger, R. E. Burgan et. al. // *International Journal of Wildland Fire*. – 2004. – Vol. 13. – P. 133–142.
9. Genton, M. Spatiotemporal 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, Issue 1. – P. 87–97. doi: 10.1071/wf04034
10. Baranovskiy, N. A web-oriented geoinformation system 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
11. Lee, J. Forest fire risk assessment: an illustrative example from Ontario, Canada [Text] / J. S. W. Lee, W. J. Braun, B. L. Jones, D. G. Woolford, B. Mike // *Journal of Probability and Statistics*. – 2010. – P. 1–26. doi: 10.1155/2010/823018
12. Zadeh, L. From computing with numbers to computing with words – from manipulation of measurements to manipulation of perceptions [Text] / L. Zadeh // *International Journal of Applied Math. and Computer Science*. – 2002. – Vol. 12, Issue 3. – P. 307–324.
13. Pawlak, Z. Rough Sets [Text] / Z. Pawlak, W. Jerzy, R. Slowinski, W. Ziarko // *Comm. of ACM*. – 1995. – Vol. 38, Issue 11. – P. 88–95.
14. Pawlak, Z. Vagueness – a Rough Set View [Text] / Z. Pawlak // *Lecture Notes in Computer Science*. – 1997. – P. 106–117. doi: 10.1007/3-540-63246-8\_7
15. Ager, A. A. Modeling wildfire risk to northern spotted owl [Text] / A. A. Ager // *Forest Ecology and Management*. – 2007. – Vol. 246, Issue 1. – P. 45–56. doi: 10.1016/j.foreco.2007.03.070
16. Гельфанд, И. Лекции по линейной алгебре [Текст] / И. М. Гельфанд. – М.: Добросвет, МЦНМО, 1998. – 320 с.
17. Марченко, П. Геоинформационные модели и методы интегральной оценки природно-техногенной опасности территориальных систем [Текст]: автореф. дис. ... докт. техн. наук: спец. 25.00.35 / П. Е. Марченко. – Нальчик, 2010. – 324 с.
18. Граб, М. Модели, методы и алгоритмы распространения лесных пожаров [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: спец. 01.05.02 / М. В. Граб. – Харьков: ХНУРЭ, 2004. – 230 с.