

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ АВАРИЙ И КАТАСТРОФ В ГИС НА ПРИМЕРЕ ДИНАМИКИ КОНТУРОВ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

К.А. Слезин

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»

Аннотация. В статье рассмотрены некоторые геоинформационные системы, а также выявлены их основные достоинства и недостатки. Описан подход к моделированию динамики лесных пожаров при помощи геометрического представления расширяющихся контуров. Разработана модель равномерно распределяющегося контура. Описаны макросы представления модели для ГИС. Рассмотрен процесс моделирования в ГИС при различных условиях окружающей среды.

Ключевые слова: моделирование, аварии, катастрофы, геоинформация, информационная система, динамика.

MODELING OF TECHNOGENIC ACCIDENTS AND DISASTERS IN GIS USING THE EXAMPLE OF FOREST FIRE CONTOUR DYNAMICS

K.A. Slezin

Tambov State Technical University

Abstract. The article discusses several geographic information systems (GIS) and identifies their main advantages and disadvantages. An approach to modeling forest fire dynamics using a geometric representation of expanding contours is described. A model of uniformly distributed contour expansion is developed. Macros for representing the model in GIS are presented. The process of modeling in GIS under various environmental conditions is examined.

Keywords: modeling, accidents, disasters, geoinformation, information system, dynamics.

С развитием информационных технологий, а также глобальной сети интернет становятся все более популярными системы географического характера. Большинство данных информационных систем предоставляют функции по работе со статическими данными. Особый интерес вызывают геоинформационные системы способные моделировать те или иные динамические процессы. Наиболее часто предоставляются функции по моделированию или расчету маршрутов движения транспортных средств.

В связи с все большим учащением техногенных аварий и катастроф, в частности лесных пожаров, становятся все более актуальными интеллектуальные геоинформационные системы, предоставляющие набор функций по анализу и моделированию данных процессов.

Изучив область геоинформационных систем становится понятно, что средства моделирования природных и техногенных процессов практически отсутствуют в современном множестве программных комплексов.

Особую опасность в последние годы представляют лесные пожары. Ежегодно на земле возникает до 400 тысяч лесных пожаров, повреждающих около 0,5% общей площади лесов и выбрасывающих в атмосферу миллионы тонн продуктов горения. В связи с этим все более актуальной становится область моделирования лесных пожаров с использованием геоинформационных систем.

Говоря о динамике распространения лесных пожаров, чаще всего имеют в виду процессы, распространение которых описывается аппроксимируемыми экспериментальными данными, физикой и химией горения растительности. Однако, существуют подходы, основанные на механике и процессах управления.

Простейшим подходом к получению модели движения контура, состоит в том, что каждая часть контура перемещается на плоскости не зависимо от соседних элементов в направлении внешней нормали к контуру. При этом ее скорость зависит как от различных факторов как окружающей среды, так и природы пожара.

При моделировании динамики пожаров обычно прибегают к геометрической интерпретации. Рассматривается трехмерное пространство, образованное координатами плоскости x , y и осью времени t . В этом пространстве последовательность контуров пожара образует расширяющийся конус K (рис. 1). Задача определения формы контура в конкретный момент времени, сводится к определению угла наклона касательной к фронту в конкретной точке. Для построения замкнутого контура чаще всего используются метод обхода по углу направления фронта. Выбирается некоторый шаг и производится обход окружности с вычислением смещения фронта в каждой точке.

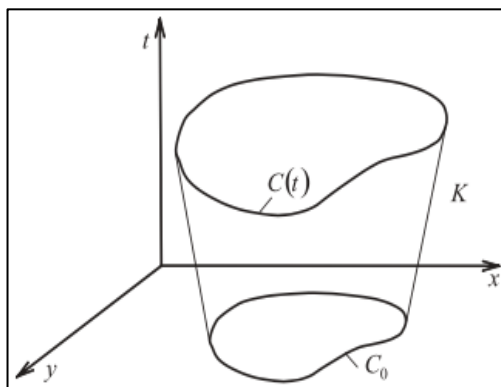


Рисунок 1 – Конус, образованный последовательностью контуров пожара

Контур пожара в каждый момент времени рассматривается как непрерывная дифференцируемая линия на плоскости. В дальнейшем используется два вида уравнений этой линии: заданные в неявном виде

$\varphi(x, y, t) = 0$ и записанные в явном виде, когда уравнение разрешено относительно одной из пространственных переменных например, $y = f(x, y), (x, y) \in D$. В каждой точке контура должно выполняться соотношение $\frac{d\varphi}{dt} = 0$, откуда следует уравнение Гамильтона-Якоби

$$\frac{d\varphi}{dt} + v^T \text{grad}\varphi = 0, \quad (1)$$

где $v = [v_x, v_y]^T$ – вектор скорости, $\text{grad}\varphi \left[\frac{d\varphi}{dx}, \frac{d\varphi}{dy} \right]^T$. Значок T означает транспонирование.

Таким образом, можно вывести нормальную скорость контура

$$v_n = \frac{(\text{grad}\varphi)^T}{|\text{grad}\varphi|} v, \quad (2)$$

где $\text{grad}\varphi/|\text{grad}\varphi|$ – единичный вектор нормали к контуру, $v_n = |v_n|$ – величина нормальной скорости контура. С учетом (2) уравнение движения контура примет вид

$$\frac{d\varphi}{dt} + v_n |\text{grad}\varphi| = 0, \quad (3)$$

причем при $t = 0$

$$\varphi(x, y, 0) = \varphi_0(x, y), \quad (4)$$

где $\varphi_0(x, y) = 0$ – уравнение внешней границы области D .

При задании контура пожара в явном виде

$$y = f(x, t) \quad (5)$$

можно записать:

$$\varphi(x, y, t) = f(x, t) - y, \quad (6)$$

и из (3) следует:

$$\text{grad}\varphi = \left[\frac{dy}{dx}, -1 \right]^T, |\text{grad}\varphi| = \left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial y}{\partial x} + v_n \sqrt{1 + \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2} = 0. \quad (8)$$

Уравнение контура можно записать также в виде

$$\varphi(x, y, t) = y - f(x, t) = 0.$$

В этом случае в уравнении (8) второе слагаемое войдет с минусом. Знак этого слагаемого связан с выбором положительного обхода контура. Уравнение (8) соответствует положительному направлению обхода контура по часовой стрелке.

Начальное условие к уравнению (8): при $t = 0$

$$y(x, 0) = f(x, 0) = f_0(x), \quad (9)$$

причем $y = f_0(x)$ – уравнение линии $\varphi_0(x, y) = 0$, записанное в явном виде.

Уравнение (9) можно получить чисто геометрически, исходя лишь из рассмотренной выше гипотезы, согласно которой каждая точка контура движется в направлении нормали к контуру.

На рисунке 2 изображено положение контура в два близких момента времени t и $t + \Delta t$. Рассмотрим точку C , которая в момент $t + \Delta t$ переместилась в положение C' . Координаты точки C были $(x, y(x, t))$, координаты точки C' : $(x + \Delta x, y(x + \Delta x, t + \Delta t))$.

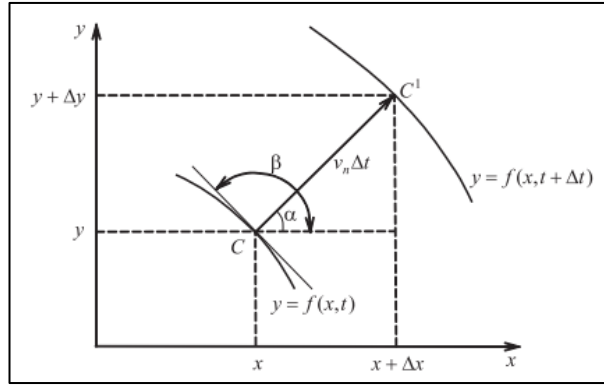


Рисунок 2 – К выводу уравнения движения контура

Рассмотрим подробнее координату y точки C' . Из треугольника $CC'A$
 $y(x + \Delta x, t + \Delta t) = y(x + v_n \cos \alpha \Delta t, t + \Delta t)$.

Разложим в ряд правую часть последнего равенства в точке (x, y) .

Ограничиваясь линейными членами, имеем

$$y(x + \Delta x, t + \Delta t) = y(x, t) + \frac{\partial y}{\partial x} v_n \cos \alpha \Delta t + \frac{\partial y}{\partial t} \Delta t.$$

С другой стороны, как видно из рис. 6,

$$y(x + \Delta x, t + \Delta t) = y(x, t) + \Delta y = y(x, t) + v_n \sin \alpha \Delta t.$$

Приравнивая правые части последних двух равенств, получим

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial y}{\partial x} v_n \cos \alpha - v_n \sin \alpha = 0. \quad (10)$$

Но, как видно из рисунка, угол α связан с углом β , определяемым производной dy/dx : $\beta = \arctg(y_x)$. Имеем

$$\alpha = \beta - \frac{\pi}{2}, \sin \beta = \frac{y_x}{\sqrt{1+y_x^2}}, \cos \frac{1}{\sqrt{1+y_x^2}},$$

и уравнение (10) после подстановки этих значений примет окончательный вид, совпадающий с (8):

$$\frac{\partial y}{\partial x} + v_n \sqrt{1 + \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)^2} = 0.$$

Если продифференцировать (8) по x и ввести новую переменную $z = dy/dx$, то получим описание движения контура в виде квазилинейного уравнения относительно функции двух переменных

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (v_n \sqrt{1 + z^2}) = 0 \quad (11)$$

с начальным условием $t = 0, z(x, 0) = z_0(x)$.

Перепишем уравнение (11) в виде

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (v_n \sqrt{1 + z^2}) \frac{\partial z}{\partial x} = 0. \quad (12)$$

Если пользоваться понятием производной по направлению, то левую часть уравнения (12) можно рассматривать как производную от функции $z(x, t)$ в направлении, заданном уравнением

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (v_n \sqrt{1 + z^2}). \quad (13)$$

Для определенности начальный контур всегда будет задаваться как многообразие Λ_0 в виде окружности малого радиуса r_0 , уравнение которой имеет вид

$$x = r_0 \cos \omega, y = r_0 \sin \omega, \omega \in [0; 2\pi].$$

Функция, описывающая изменение угла наклона касательной к начальному контуру при $t = 0$, имеет вид

$$z_0(x) = \frac{\partial y}{\partial x} = -\frac{x}{\sqrt{r_0^2 + z^2}} = -ctg\omega, \quad (14)$$

А уравнение семейства характеристик –

$$\frac{\partial x}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (v_n \sqrt{1 + z^2}) \Big|_{z=z_0(x)} = -\frac{\partial v_n}{\partial z} \sqrt{1 + z^2} + v_n \frac{z}{\sqrt{1 + z^2}} = \frac{\partial v_n(z_0(\omega))}{\partial z} \cdot \frac{1}{\sin \omega} + v_n(z_0(\omega)) \cos \omega.$$

Так как $v_n = v_0 \chi(z)$, то

$$\frac{\partial v_n(z)}{\partial z} = v_0 \frac{\partial \chi_n}{\partial \omega} \cdot \frac{\partial \omega}{\partial z}.$$

Последний сомножитель в правой части написанного выражения можно вычислить из соотношения (14)

$$\omega = \arctg(-z),$$

откуда

$$\frac{\partial \omega}{\partial z} = \sin^2 \omega.$$

Следовательно, уравнение семейства характеристик примет вид

$$\frac{\partial x}{\partial t} = F(\omega), \quad (15)$$

где

$$F(\omega) = v_0 \left(-\frac{\partial \chi_n}{\partial \omega} \sin \omega + \chi_n \cos \omega \right), 0 \leq \omega \leq \pi. \quad (16)$$

Отсюда следует, что координата x контура, соответствующая параметру ω , в момент времени t , имеет вид

$$x(\omega, t) = r_0 \cos \omega + v_0 t \left(-\frac{\partial \chi_n}{\partial \omega} \sin \omega + \chi_n \cos \omega \right). \quad (17)$$

Соответствующую координату можно вычислить из соотношения

$$y(\omega) = \int_0^{x(\omega)} \frac{\partial y}{\partial x} dx. \quad (18)$$

Преобразуем $dx = \frac{\partial x}{\partial \omega} d\omega$ и вычислим частную производную из (17)

$$y(\omega, t) = \int_0^\omega \cos \omega \left(r_0 + v_0 t \left(\chi_n + \frac{\partial^2 \chi_n}{\partial \omega^2} \right) \right) d\omega.$$

Дважды интегрируя по частям, получим окончательно

$$y(\omega, t) = r_0 \sin \omega + v_0 t \left(\frac{\partial \chi_n}{\partial \omega} \cos \omega + \chi_n \sin \omega \right). \quad (19)$$

Формулы (17) и (19) позволяют в принципе рассчитывать контуры пожаров для любых аналитически или графически заданных идиокатрис.

Пусть фигуратриса имеет вид

$$\chi_n(\alpha) = a + b \cos^k \alpha, \quad (20)$$

где

$$a + b = 1, a > b, k \in \{0, 1, 3, 5, \dots\}.$$

Проделив преобразования в соответствии с формулами (17), (20), получим

$$\begin{cases} x(\omega, t) = \{r_0 + v_0[a + b(\cos^{k-2} \omega \sin^2 \omega + \cos^k \omega)]t\} \cos \omega \\ y(\omega, t) = \{r_0 + v_0[a + b(1 - k) \cos^k \omega]t\} \sin \omega \end{cases}. \quad (21)$$

Пусть $k = 0$. Тогда $\chi_n(\alpha) = a + b \equiv 1$ и $x_n = x_0 = \text{const}$. Из (21) следует, что

$$\begin{cases} x(\omega, t) = (v_0 t + r_0) \cos \omega \\ y(\omega, t) = (v_0 t + r_0) \sin \omega. \\ w \in [0, \pi] \end{cases} \quad (22)$$

где v_0 – скорость ветра, t – время, прошедшее с начала пожара, ω – угол обхода контура.

На основании формулы (22) была построена модель в виде макроса для геоинформационной системы:

$x: (\{r\} + \{wind\} \cdot \{time\}) \cdot \cos(\{omega\}),$

$y: (\{r\} + \{wind\} \cdot \{time\}) \cdot \sin(\{omega\}).$

Т.е. контуры в последовательные моменты времени представляют собой концентрические окружности.

В работе были рассмотрены достоинства и недостатки некоторых популярных ГИС. Предложен подход к моделированию динамики контуров лесных пожаров. Построена одна из простейших моделей контура. Описанная модель была преобразована в макрос для разработанной интеллектуальной геоинформационной системы.

Список литературы

1. Богданов, К.А. Использование Карт Google Maps в задачах имитационного моделирования / К.А. Богданов // В мире научных открытий. – Красноярск: ООО «Научно-инновационный центр», 2010. №4-4. – С. 40-41.
2. Демидович, Е.М. Разработка геолокационного мобильного приложения / Е.М. Демидович, Д.А. Масальский // Актуальные проблемы социально-экономического развития предприятий, отраслей, комплексов: сб. науч. работ. – Тула: «Институт экономики и управления», 2015. С. 114-120.
3. Пилипенко, С.А. Алгоритм построения маршрутов в электронных картах на примере сервиса Яндекс.Карты / С.А. Пилипенко // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2017. №1(9). – С. 149-151.
4. Аникеева, О.С. Публикация карт в сети Интернет: эволюция картографии / О.С. Аникеева // Наука. Инновации. Технологии. – Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2015. №2. С. – 78-85.
5. Доррер, Г.А. Динамика лесных пожаров / Г.А. Доррер; Ин-т вычислительного моделирования СО РАН, М-во образования и науки РФ, Федеральное агентство по образованию, Сиб. Гос. технологический ун-т. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. 404 с., 85 илл., 16 табл.

References

1. Bogdanov, K.A. The Use of Google Maps in Simulation Modeling Tasks / K.A. Bogdanov // In the World of Scientific Discoveries. – Krasnoyarsk: LLC "Scientific-Innovative Center", 2010. No. 4-4. – Pp. 40-41.
2. Demidovich, E.M., Masalsky, D.A. Development of a Geolocation Mobile Application / E.M. Demidovich, D.A. Masalsky // Current Issues of Socio-Economic Development of Enterprises, Industries, and Complexes: Collection of Scientific Works. – Tula: "Institute of Economics and Management", 2015. – Pp. 114-120.
3. Pilipenko, S.A. The Algorithm for Building Routes in Electronic Maps on the Example of Yandex.Maps / S.A. Pilipenko // Scientific Bulletin of Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. – Voronezh: Voronezh State Technical University, 2017. No. 1(9). – Pp. 149-151.
4. Anikeeva, O.S. Publishing Maps on the Internet: The Evolution of Cartography / O.S. Anikeeva // Science. Innovations. Technologies. – Stavropol: North-Caucasian Federal University, 2015. No. 2. – Pp. 78-85.
5. Dorrer, G.A. The Dynamics of Forest Fires / G.A. Dorrer; Institute of Computational Modeling of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Federal Agency for Education, Siberian State Technological University. – Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2008. 404 pp., 85 illustrations, 16 tables.