

## ГИС-ОРИЕНТИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

*Представлена мультиагентная ГИС-ориентированная система моделирования и управления чрезвычайными ситуациями, вызываемыми процессами на поверхности Земли. Система описана с использованием формализмов вложенных сетей Петри. В качестве конкретного процесса, на примере которого более подробно рассматриваются методы моделирования и управления, выбраны природные пожары.*

**Ключевые слова:** чрезвычайные ситуации, динамические процессы на поверхности Земли, мультиагентная ГИС-ориентированная система, вложенные сети Петри, природные пожары.

G.A. Dorrer  
Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

## GIS-ORIENTED SYSTEM FOR MODELING EMERGENT SITUATIONS ON EARTH SURFACE

*A multi-agent GIS-based system for modeling and managing emergent situations caused by processes on the Earth's surface presented. The system described using the formalities of Nested Petri nets. As a specific process, on the example of which modeling and control methods considered in more detail, wildfires selected.*

**Keywords:** emergent situations, dynamic processes on the Earth's surface, multi-agent GIS-oriented system, embedded Petri nets, wildfires.

### Введение

В связи с глобальными изменениями климата увеличилась вероятность наступления чрезвычайных ситуаций, вызываемых природными и техногенными катастрофами, которые часто представляют собой стихийные динамические процессы на поверхности Земли. Наводнения, селевые потоки, оползни, природные пожары, распространение вредителей растений – вот примеры таких процессов. Эти процессы становятся все менее предсказуемыми по масштабам и последствиям. Кроме того, ущерб природе наносит и деятельность человека. Так, при добыче нефти на шельфе возможны ее разливы по поверхности воды, что приводит к разрушению водных экосистем. Неразумное хозяйствование может привести к постепенному исчезновению растительности – опустыниванию территории. [1-4,]. На рисунках 1-3 приведены примеры таких процессов.

Если рассмотреть разнородные природные и антропогенные процессы на поверхности Земли, то можно увидеть, что у них, несмотря на различную физическую природу, у них можно обнаружить следующие общие черты.

1. Все указанные процессы могут быть описаны как подвижные области, на поверхности Земли, имеющие способности к расширению, сужению, перемещению, разделению и слиянию. В дальнейшем мы также будем использовать термин «процесс распространения».

2. В первом приближении границы процессов распространения можно представить как однократные плоские волны на поверхности Земли, движение которых подчиняются принципу Гюйгенса.

3. Все указанные процессы, вследствие своих характерных размеров, поддаются картографированию. В связи с этим, при их моделировании необходимым становится применение ГИС – технологий.

4. Ко всем классам подобных динамических процессов могут быть применены методы дистанционного мониторинга – космического и авиационного, в том числе с помощью беспилотных летательных аппаратов.

5. С точки зрения теории управления перечисленные объекты являются объектами с распределенными параметрами и распределенным управлением. Возможные методы управления этими процессами аналогичны и часто не зависят от природы процесса. Так, одним из методов борьбы с процессом является прямое воздействие на его фронт с целью снизить скорость распространения или остановить его, другой распространенный метод управления – локализация, т.е. создание непреодолимых барьеров на пути движения волны.

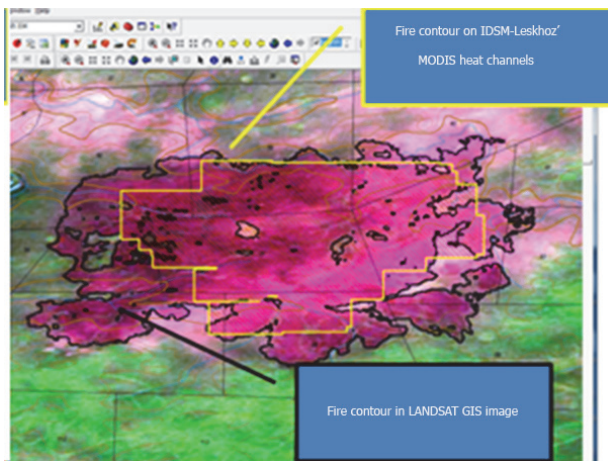


Рис. 1. Контур лесного пожара (обработанный космический снимок)

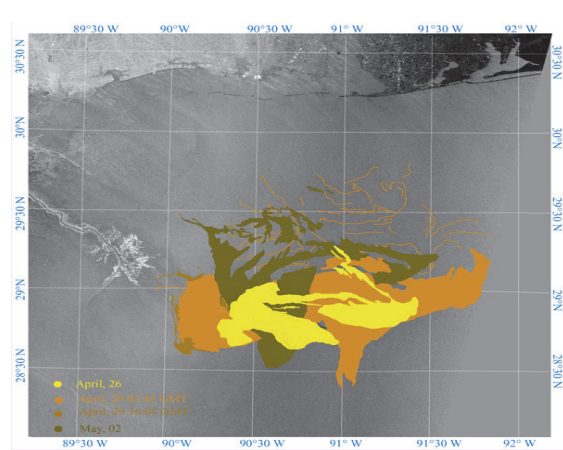


Рис. 2. Композиция четырех снимков разлива нефти в Мексиканском заливе с 04.26.10 по 05.02.10, полученная с ASAR Envisat radar

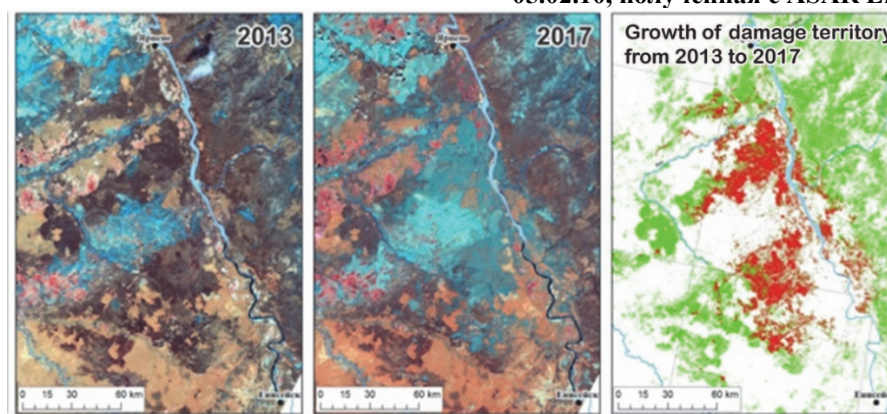


Рис. 3. Повреждение Сибирским шелкопрядом лесов Енисейской темнохвойной тайги за период с 2013 по 2017 годы. Виден рост поврежденной территории.

Целью настоящей работы является создание и реализация моделей динамики и управления указанными выше процессами как ГИС-ориентированных мультиагентных систем на основе использования формализма вложенных сетей Петри. При этом в качестве конкретного процесса, на примере которого более подробно рассматриваются методы моделирования и управления, выбраны природные пожары.

#### Модель динамики процесса распространения

Процесс распространения представляет собой однократную волну на горизонтальной плоскости (отображенную на карте местности соответствующего масштаба). Координатная система  $X = [x_1, x_2]^T$  привязана к карте;  $X \in D$ , где  $D$  – рассматриваемая сценарная область,  $t$  – время.

Теория пространственных волн различной физической природы достаточно хорошо разработана [5-6]. Мы воспользуемся простейшей моделью этого процесса.

Пусть  $\varphi(X, t)=0$  уравнение фронта волны, при этом функция  $\varphi(X, t)$  предполагается непрерывной, гладкой и удовлетворяющей уравнению Гамильтона-Якоби

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + V * \text{grad} \varphi = 0, \quad (1)$$

где  $V = V(X) = [v^1, v^2]$  – вектор-строка скорости фронта волны.

Вектор-столбец градиента  $\text{grad} \varphi = \left[ \frac{\partial \varphi}{\partial x^1}, \frac{\partial \varphi}{\partial x^2} \right]^T = P = [p^1, p^2]$  – нормаль к линии фронта. Уравнение (1) рассматривается при начальных условиях

$$X(0) = X_0(\alpha), P(0) = P_0(\alpha), \quad (2)$$

где  $X_0(\alpha)$  и  $P_0(\alpha)$  представляют собой параметрическое представление фронта волны и множества нормалей к нему в начальный момент  $t=0$ ,

$\alpha \in U$  – допустимое множество значений параметра  $\alpha$ .

Для целей численного моделирования динамики процесса используется подход, основанный на использовании нормальной скорости фронта  $V_n = V * P/|P|$ , где  $|P|$  – длина нормали и  $P/|P|$  – единичный вектор нормали к линии фронта.

При этом уравнение (1) преобразуется к виду

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + V_n |P| = 0. \quad (3)$$

Уравнение (3) также рассматривается при начальных условиях (2).

В различных физических средах скорость движения фронта волны зависит от множества параметров внешней среды. В рамках данного подхода нормальная скорость движения фронта в любой точке рассматриваемой области может быть представлена как произведение двух функций:

$$V_n(X, t, W, S, \beta, \gamma) = V_0(X, t, W, S) * \chi_n(P, W, S), \quad (4)$$

где  $V_0$  – максимальная скорость распространения процесса. Множитель  $0 \leq \chi_n(P, W, S) \leq 1$  определяет локальные направления движения фронта волны и называется индикатрисой нормальной скорости фронта или фигуротрисой. Использование фигуротрис позволяет создать эффективный алгоритм численного моделирования процесса распространения пространственной волны на основе метода подвижных сеток [7].

Данный алгоритм естественным образом позволяет перейти к агентному представлению моделей динамики рассматриваемых процессов.

#### Агентное моделирование системы управления процессами распространения

Авторами разработана агентно-ориентированная система, содержащая два типа агентов, обозначаемых  $A$  и  $B$ . Агенты типа  $A$  моделируют движение фронта волны. Они могут находиться в активном и пассивном состояниях.  $A$ -агент, находящийся в активном состоянии, определяет движение фронта процесса. Агенты типа  $B$  ( $B$ -агенты) моделируют воздействие на агентов типа  $A$ . Они преследуют единственную цель – перевести все  $A$ -агенты в пассивное состояние. Для этого  $B$ -агент движется по среде моделирования к ближайшему  $A$ -агенту и, подойдя к нему, осуществляет управляющее воздействие, направленное на его уничтожение.

Как известно, одним из наиболее распространенных и эффективных формализмов моделирования и анализа сложных распределенных систем в настоящее время являются сети Петри (Petri nets) [8,9]. Сети Петри содержат узлы двух типов, которые называются позициями и переходами. Позиции содержат некоторые ресурсы, а переходы управляют перераспределением этих ресурсов. Функционирование сетей Петри позволяет исследовать системы в терминах «условие – событие», что дает возможность строить различные сценарии поведения систем, выявлять достижимость определенных состояний, возможность возникновения циклов, конфликтов, взаимных блокировок и других особенностей поведения. В последние годы ведутся работы по расширению функциональных возможностей сетей Петри за счет идей объектно-ориентированного и агентно-ориентированного подходов с целью создания моделей, отражающих иерархическую и мультиагентную структуру систем. Одним из инструментов решения данной проблемы являются так называемые вложенные сети Петри (Nested Petri nets) [9]. Эти сети представляют собой расширение обыкновенных сетей Петри, в них в качестве ресурсов могут выступать самостоятельные сети Петри, выступающие в качестве сателлитных агентов по отношению к системной сети. При этом осуществляется синхронизация действий сателлитных агентов как с системной сетью, так и с другими сателлитными агентами. Синхронизация осуществляется путем одновременного срабатывания помеченных переходов в различных сетях, для этой цели предусмотрены специальные функции пометки переходов.

Рассмотрим формальное описание вложенной сети Петри, моделирующей взаимодействие указанных агентов.

Двухуровневая ГИС-ориентированная вложенная сеть Петри  $NPN$  (Nested Petri Net) представляет собой кортеж:

$$NPN = \{SN, (NA_1, \dots, NA_k), (NB_1, \dots, NB_m), A, G\}. \quad (6)$$

Здесь:  $SN$  – системная сеть, представляющая собой цветную сеть Петри, которая управляет функционированием сателлитных сетей,

$NA_i, i=1, \dots, k$  – сателлитные цветные сети Петри, моделирующие поведение агентов типа  $A$ ,

$NB_j, j=1, \dots, m$  – сателлитные цветные сети Петри, моделирующие поведение агента типа  $B$ ,

$A = A_v \cup A_h$  – функция пометки переходов, с помощью которых осуществляется вертикальная  $A_v$  и горизонтальная  $A_h$  синхронизация элементов вложенной сети.

$G$  – функция отображения состояния сети на карте местности.

Схема сети  $NPN$  приведен на рисунке 4.

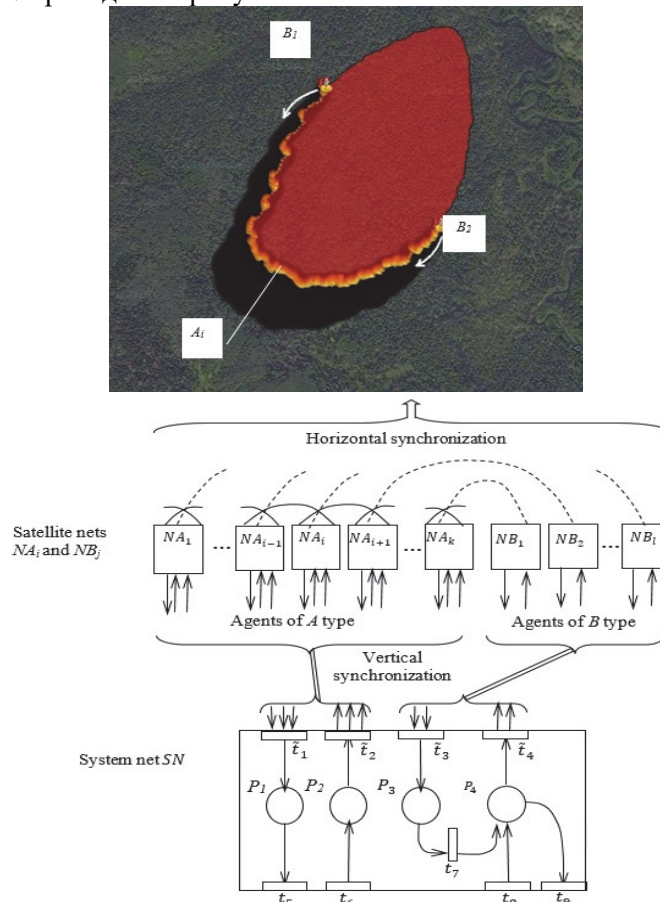


Рис. 4. Схема двухуровневой вложенной сети Петри, моделирующей взаимодействие двух типов агентов –  $A$  и  $B$  под управлением системной сети  $SN$

Структура сетей, входящих в  $NPN$ , аналогична как для системной, так и для спутниковых сетей. Раскрашенная сеть Петри  $PN$  в соответствии с формализмом К. Йенсена, представляет собой кортеж

$$SN = \{ \theta, \Sigma, P, T, A, C, E, I, A_v, \}, \quad (7)$$

где:  $\theta$  – дискретное время,  $time = integer$ ;

$\Sigma$  – цветовое множество (виды ресурсов);

$P$  – множество позиций,  $P = \{p_1, \dots, p_N\}$ ;

$T$  – множество переходов,  $T = \{t_1, \dots, t_M\}$ ;

$A$  – множество дуг,  $A = \{a_1, \dots, a_K\}$ ;

$C$  – цветовая функция  $\Sigma \rightarrow P$ ;

$E$  – выражения на дугах  $E \rightarrow A$ ;

$I$  – функция инициализации  $M_0 \rightarrow P$ , где  $M_0$  – начальная маркировка сети

$A = A_v \cup A_h$  – функция пометки переходов, осуществляющих вертикальную и горизонтальную синхронизацию. Вертикальная синхронизация помечается знаком тильда:  $\tilde{t}_{AS}$ , а горизонтальная горизонтальной чертой:  $\bar{t}_{i+1}$ .

Рассмотрим ресурсы, которые содержатся в позициях спутниковых сетей.

Ресурс (фишка в спутниковой сети), характеризующей состояние агента типа  $A$ , включает компоненты: номер агента, его статус (активен или нет), координаты на карте, текущее время, временной шаг, пространственный шаг, запас горючего.

Аналогично, ресурс, характеризующий состояние агента типа  $B$ , содержит компоненты:

номер агента, его статус, координаты на карте, пространственный шаг, текущее время, временной шаг, скорость перемещения, интенсивность уменьшения запаса горючего при взаимодействии с агентом типа *A*

Описанная система реализована в виде программы «Тайга – 3» [7], предназначенной для поддержки принятия решений и обучения персонала тактике борьбы с природными пожарами [10]. Система выполняет, в частности, следующие функции:

- отображение на карте местности сценариев развития процесса и управления им;
- определение достижимости определенных состояний;
- оценка управляемости процесса;
- оценка возможного ущерба при развитии процесса;
- оценка правильности принимаемых решений при обучении персонала.

### Заключение

Автор считает, что созданная и реализованная модель динамики и управления процессами типа однократных волн на поверхности Земли как ГИС-ориентированных мультиагентных систем на основе использования формализмов вложенных сетей Петри, является оригинальной и может найти применение при моделировании опасных природных процессов, а также при обучении оперативного персонала природоохранных служб.

### Литература

1. ГОСТ Р 22.1.09-99. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование лесных пожаров. Общие требования. – Введ. 25.05.99. – М.: Изд-во стандартов, 1999. 18 с.
2. Абдулкасимов А.А. Глобальные и региональные проблемы опустынивания аридных и семиаридных ландшафтов // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. География. Геоэкология. – Воронеж, 2006. С. 20–24.
3. Динамика высокоэнергетических геофизических образований (фронты, оползни, сели, плотностные течения): отчет о НИР / Моск. физико-техн. ин-т; рук. Б. К. Ткаченко // Информационный бюллетень РФФИ. – М.: МФТИ, 1996. Т. 4. № 5. С. 385. – (РФФИ: 96-05-65052-а).
4. ESRI. GIS software that gives you the geographic advantage. Gulf of Mexico Oil Spill. Timeline-map [Электронный ресурс] / ESRI. – Электрон. дан. 2010. – Режим доступа: <http://www.esri.com/services/disaster-response/gulf-oil-spill-2010/timeline-map.html>
5. Зельдович Я.Б. Сложные волновые режимы в распределенных динамических системах: обзор / Я.Б. Зельдович, Б.А. Маломед // Радиофизика. 1982. Т. 25. № 6. С. 591–618.
6. Кринский В.И. Автоволны: результаты, проблемы, перспективы / В. И. Кринский // Математическая биофизика: межвуз. сборник. – Красноярск: КГУ, 1985. С. 82–95.
7. Доррер Г.А. Описание процессов распространения и ликвидации природных пожаров с помощью агентных моделей / Г.А. Доррер, С.В. Яровой // Сибирский лесной журнал. 2017. № 5. С. 105–113.
8. Jensen K. Coloured Petri nets: basic concepts, analysis methods and practical use. vol.1 / K.Jensen, Berlin: Springer. 234 p.
9. Ломазова И.А. Вложенные сети Петри: моделирование и анализ распределенных систем с объектной структурой / И.А. Ломазова, – М.: Научный мир, 2004. 208 с.
10. Alexandra Dorrer, Georgy Dorrer, Igor Buslov, Sergey Yarovoy. System for personnel training in decision making of wildfires fighting: Advances in forest fire research 2018 (ed. D.X. Viegas). Coimbra: [s.n.]. Pp. 1095–1103.

### Сведения об авторе

**Георгий Алексеевич Доррер**

Д-р техн. наук

проф. каф. информационно-управляющих систем

СибГУ им. М.Ф.Решетнева

Российская Федерация, Красноярск

Эл. почта: [g\\_a\\_dorrer@mail.ru](mailto:g_a_dorrer@mail.ru)

### Information about author

**Georgy Alekseevich Dorrer**

Dr. Techn. sciences'

Professor

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

Russian Federation, Krasnoyarsk

E-mail: [g\\_a\\_dorrer@mail.ru](mailto:g_a_dorrer@mail.ru)