

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

Представлена мультиагентная ГИС-ориентированная система моделирования и управления динамическими процессами на поверхности Земли, описанная в формализме вложенных сетей Петри. В качестве конкретного процесса, на примере которого более подробно рассматриваются методы моделирования и управления, выбраны природные пожары.

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

G.A. Dorrer, S.V. Yarovoy

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

MODELING DYNAMIC PROCESSES ON THE EARTH'S SURFACE

A multi-agent GIS-oriented system for modeling and controlling dynamic processes on the Earth's surface, described in the nested Petri nets formalism, is presented. As a concrete process, with the example of which methods of modeling and control are considered in more detail, wild fires are selected.

Key words: dynamic processes on the Earth's surface, multi-agent GIS-oriented system, nested Petri nets, wild fires.

Введение

В связи с глобальными изменениями климата увеличилась вероятность ущерба от природных и техногенных катастроф, 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].

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

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.

1. 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 α .

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.

1. 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 спутниковых агентов по отношению к системной сети. При этом осуществляется синхронизация действий спутниковых агентов как с системной сетью, так и с другими спутниковыми 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 спутниковых сетей,

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

$NB_j, j=1, \dots, m$ – спутниковые 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.

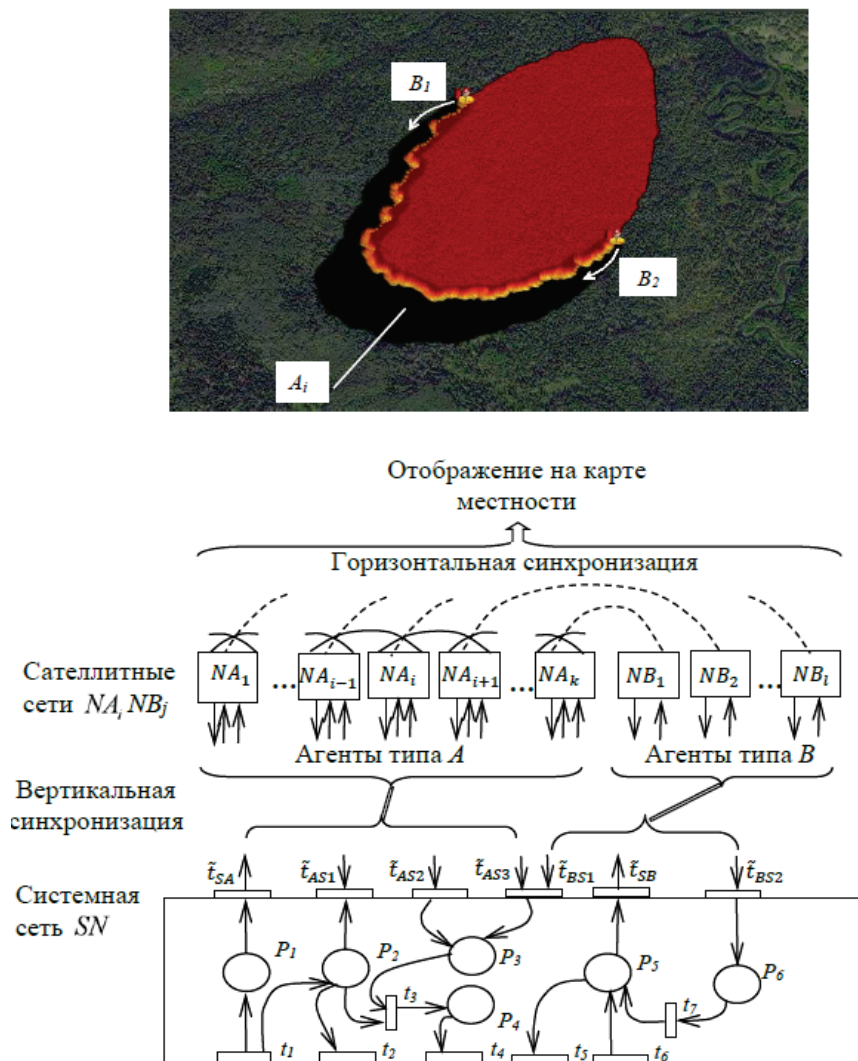


Рис. Схема двухуровневой вложенной сети Петри.
Переходы $t_1 - t_6$ определяют интерфейс с пользователем.

Структура сетей, входящих в NP , аналогична как для системной, так и для спутниковых сетей. Раскрашенная сеть Петри PN в соответствии с формализмом К.Йенсена [8], представляет собой кортеж

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

где: θ – дискретное время, $time = integer$;

Σ – 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*.

Ресурс, характеризующий состояние агента типа B , содержит компоненты: *номер агента, его статус, координаты на карте, пространственный шаг, текущее время, временной шаг, интенсивность уменьшения запаса горючего при взаимодействии с агентом типа A* . Операции над ресурсами задаются на дугах a_i сетей [8].

Описанная система реализована в виде программы «Тайга – 3» [7], послужившей основой для создания тренажерного комплекса «FIREMAN» с использованием обучающей системы MOODLE для обучения персонала тактике борьбы с природными пожарами.

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 принимаемых решений при обучении персонала.

Заключение

Авторы считают, что в данной работе новым является создание и реализация моделей динамики и управления процессами типа однократных волн на поверхности Земли как ГИС-ориентированных мультиагентных систем на основе использования формализмов вложенных сетей Петри, а также применение этих результатов к моделированию природных пожаров.

Литература

1. ГОСТ Р 22.1.09-99. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование лесных пожаров. Общие требования. – Введен 25.05.99. – М.: Изд-во стандартов, 1999. 18 с.
2. Абдулкасимов А.А. Глобальные и региональные проблемы опустынивания аридных и семиаридных ландшафтов / А. А. Абдулкасимов // Вестник 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. / K.Jensen, Berlin: Springer. V. 1. 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.

Сведения об авторах

Георгий Алексеевич Доррер

Профессор

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева

Эл. почта: g_a_dorrer@mail.ru

Российская Федерация, Красноярск

Сергей Викторович Яровой

Аспирант

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева

Эл. почта: ach_bask@mail.ru

Российская Федерация, Красноярск

Information about authors

Georgy Alekseevich Dorrer

professor,

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

E-mail: g_a_dorrer@mail.ru

Russian Federation, Krasnoyarsk

Sergey Viktorovich Yarovoy

postgraduate

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

E-mail: ach_bask@mail.ru

Russian Federation, Krasnoyarsk

УДК 574.64; 582.232

Я.В. Саванина, Е.Л. Барский, Е.С. Лобакова

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

МЕТОДОЛОГИЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СМЕШАННО-РАЗДЕЛЬНЫХ КУЛЬТУР МИКРООРГАНИЗМОВ

Рассмотрены подходы к детоксикации и очистке сточных вод и донных грунтов, загрязненных ионами тяжелых металлов (ТМ), с использованием культур цианобактерий и гетеротрофных бактерий при различных режимах культивирования - периодическом, диффузионном, смешанно-раздельном.

Ключевые слова: цианобактерии, микроводоросли, бактерии, диализное культивирование, водная токсикология, тяжелые металлы, биологическая очистка, биоремедиация.

УДК 574.64; 582.232

Ya.V. Savanina, E.L. Barsky, E.S. Lobakova

Moscow State University Lomonosov

PURIFICATION METHODOLOGY WASTEWATER TREATMENT USING MIXED-SEPARATE CULTURES OF MICROORGANISMS

Approaches to detoxification and purification of sewage and bottom soils contaminated with heavy metal ions (TM) using cultures of cyanobacteria and heterotrophic bacteria under different cultivation regimes - periodic, diffusion, mixed-separate (association) are considered.

Keywords: cyanobacteria, microalgae, bacteria, dialysis cultivation, water toxicology, heavy metals, biological purification, bioremediation.

Введение. Процессы самовосстановления и самоочищения окружающей среды уже не справляются с поступающими в нее загрязняющими веществами, которые из атмосферы и водной среды переходят в почву и донные грунты, где и аккумулируются. Соответственно растет востребованность технологий очистки. Их выбор определяется не только типом и количеством загрязнений, но также целями и задачами очистки. Такими задачами могут быть: детоксикация - снижение концентрации и токсичности действующих веществ, накопление ТМ с целью их возможного дальнейшего использования, в некоторых случаях – метаболизация накапливающихся в донных отложениях токсикантов.