

## РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКИХ ДИФФУЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ РАЗМЕЩЕНИЯ

**А.Б.Гнатюк**

ФГБОУВПО «Ивановский филиал Владимирского юридического института  
ФСИН России», Иваново, Россия. E-mail: abg-07@mail.ru

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы расчета динамики пространственного распространения влияния физических и социально-экономических процессов на прилегающую территорию при решении задач размещения предприятий и производственных комплексов. Для этого предлагается использовать теорию клеточных автоматов. При разработке программного алгоритма работы клеточного автомата используется объектно-ориентированный подход моделирования диффузионных процессов.

**Ключевые слова:** задачи размещения, диффузионные процессы, функции пространственного влияния, клеточный автомат, моделирование.

UDC 681.3.06

## CALCULATION OF DYNAMIC DIFFUSION PROCESSES AT SOLVING THE LOCATION PROBLEM

**A.B. GNATYUK**

Ivanovo Branch of Vladimir Juridical Institute, Ivanovo, Russian Federation  
E-mail: abg-07@mail.ru

**Abstract.** The problems of calculating the dynamics of the spatial extent of the influence of physical and socio-economic processes in the neighborhood for solving facility and industrial complexes location. The use of the theory of cellular automata is proposed for this purpose. An object-oriented modeling approach of diffusion processes uses in developing the software algorithm.

**Key words:** location problem, diffusion processes, functions of spatial effects, cellular automata, modeling.

При решении задач рационального размещения предприятий и производственных комплексов, особенно на микроуровне, необходимо учитывать одновременно большое количество социально-экономических, природно-экологических и технических факторов, в том числе их пространственное

распространение как от внешних по отношению предприятию объектов, так и влияние самого предприятия на окружающую экологическую и экономическую среды. Учитывая общность характеристик распространения и необходимость при принятии решения по размещению одновременного учета различных факторов, необходимо создание достаточно универсальной технологии моделирования процессов диффузии.

В теории размещения теория пространственной диффузии, началом которой в 50-е годы прошлого века послужила теория «географии времени» (timegeography) [1], в основном применяется для описания того, как рожденная в центре инновация движется в пространстве.

Известны два основных типа диффузии инноваций. Первый – диффузия через распространение (expansion). В этом случае число носителей инновации и площадь инновационной территории постепенно растут. Второй тип носит название диффузии через перемещение (relocation). В этом случае носители инновации перемещаются из одного места в другое и создают новые центры инновационной активности [2]. Такие диффузионные процессы имеют много общего с пространственным распространением различного рода физических процессов, например, распространением загрязнения воздушной и водной сред, распространением пожара и т.п. Общим является то, что при моделировании пространственного распространения следует учитывать не только свойство самого явления или процесса, но, очевидно, и свойства или контекст территории, на которую оказывают влияние определенные объекты. При изучении диффузии социально-экономических инноваций скорость распространения инноваций зависит от вязкости среды и ее восприимчивости к инновациям. Существуют барьеры диффузии, которые не пропускают инновации.

Пространственный характер процессов диктует применение для моделирования геоинформационных технологий. Исследуемая территория разбивается (квантуется) на элементарные участки, что делает целесообразным для

моделирования распространения влияния от объектов с учетом свойств территории использование математической модели клеточных автоматов.

Основы теории клеточных автоматов были разработаны в 1969 году [3]. Клеточные автоматы являются стилизованными, синтетическими мирами, определенными простыми правилами, подобными правилам настольной игры. Пространство представлено равномерной сеткой, каждая ячейка, или клетка которой, содержит несколько битов данных; время идет вперед дискретными шагами, а законы распространения выражаются единственным набором правил, например, в виде небольшой справочной таблицы, по которой любая клетка на каждом шаге вычисляет свое новое состояние по состояниям ее близких соседей.

Клеточные автоматы являются дискретными динамическими системами, поведение которых полностью определяется в терминах локальных зависимостей. В значительной степени так же обстоит дело для большого класса непрерывных динамических систем, определенных уравнением в частотных производных. В этом смысле клеточные автоматы являются аналогом физического понятия «поля». Вместо небольшого числа переменных, взаимодействие которых может быть задано произвольным образом, клеточный автомат использует много переменных (одна на клетку), но требует, чтобы они взаимодействовали только локально и единообразно.

Геоинформационные системы (ГИС) могут работать с двумя существенно отличающимися типами моделей – векторными и растровыми. В векторной модели информация представляется в виде набора координат  $X, Y$  объектов. Векторная модель особенно удобна для описания положения объектов. Растровая модель территории – это набор множества элементарных участков – клеток. Каждая клетка – это, как правило, квадрат, представляющий определенную часть территории размером  $l \times l$ . Размер клеток  $l$  определяется спецификой задачи пространственного анализа. Он должен быть таким, чтобы отобразить все детали, необходимые для анализа данных [4]. Ко-

гда при анализе свойств территории требуется моделировать диффузионные процессы, то растровые модели выходят на первое место.

В общем случае клеточные автоматы обладают следующими свойствами:

- изменения значений всех клеток происходят одновременно после вычисления нового состояния каждой клетки решетки;
- решетка однородна: невозможно различить какие-либо две области решетки по ландшафту;
- взаимодействия локальны, лишь клетки окрестности (как правило, соседние) способны повлиять на данную клетку;
- множество состояний клетки конечно.

Применение клеточного автомата для моделирования диффузионных процессов заключается в присвоении ячейке определенного набора параметров, влияющих на ее дальнейшее поведение при построении модели. Любая ячейка может быть как источником влияния при моделировании пространственных распространений, так и объектом, препятствующим этому распространению.

В динамике, при построении модели пространственного распространения методом клеточных автоматов на состояние каждой ячейки в данный момент времени влияют лишь состояния окружающих ее ячеек. Благодаря этому появляется возможность получить достаточно гибкую и универсальную модель пространственного анализа диффузионных процессов. Для практической реализации модели пространственного распространения наиболее удобно использовать объектно-ориентированный подход.

Объектно-ориентированный подход при разработке программного алгоритма работы клеточного автомата состоит в следующем. На растровую модель территории – электронную карту, приведенную к относительным координатам, накладывается сетка определенного масштаба. Масштаб может изменяться произвольно, в зависимости от тех или иных факторов таких, как масштаб самой растровой карты, необходимая точность в детализации моде-

ли пространственного распространения и т.п. Сетка имеет мнимые границы, или другими словами, физическая толщина границ между клетками равна нулю.

Программно клетка реализуется как отдельный класс, с набором полей, определяющих физические характеристики клетки как части реального географического объекта на местности, и набором методов, определяющих поведение данной клетки в зависимости от состояния ее ближайших соседей.

Таким образом, в качестве начальных данных для построения конечной модели пространственного распространения служит двумерный массив, каждый элемент которого – это клетка с заданными начальными параметрами. Объекты на плоскости, будь то источник влияния, или же препятствие для распространения влияния, могут иметь произвольную форму.

Источники пространственного влияния описываются следующим набором параметров и характеристик:

$$M_i = \langle X_i, Y_i, S_{0i}, F_i, \varepsilon \rangle, \quad (1)$$

где  $X_i, Y_i$  – координаты местоположения;  $S_{0i}$  – начальное значение фактора пространственного влияния;  $F_i$  – функция пространственного распространения (влияния);  $\varepsilon$  – допустимая ошибка расчетов.

Функция пространственного распространения определяет закон распространения фактора  $S_i$  от  $i$ -ой клетки к соседней  $j$ -клетке:

$$S_{ij} = S_i F_i(l_{ij}). \quad (2)$$

Наибольшее применение имеют следующие функции распространения:

$$F_i = 1 - l_{ij} \text{ – линейная;}$$

$$F_i = 1 - l_{ij}^2 \text{ – квадратичная;}$$

$$F_i = 1 - \frac{1}{r_{ij}} \text{ – параболическая;}$$

$$F_i = e^{-k \cdot l_{ij}^2} \text{ – нормального закона.}$$

В тех случаях, когда влияние от клетки к клетке возрастает, в функциях пространственного распространения знак минус изменяется на плюс. Функ-

ции пространственного распространения могут задаваться аналитически и табличным способом.

В модели препятствия принимается, что оно не прозрачно, имеет бесконечную высоту и коэффициент отражения от препятствия равен нулю, т.е.

$$S_{p,x,y}^o = 0, \quad x \in x_p, \quad y \in y_p, \quad (3)$$

где  $x_p, y_p$  – координаты местоположения препятствия.

Для общего случая выражение (3) будет иметь следующий вид:

$$S_{p,x,y}^o = h_i(x, y), \quad x \in x_p, \quad y \in y_p, \quad (4)$$

где  $h_i$  – коэффициент прозрачности препятствия.

При  $h_i > 1$ , процесс диффузии усиливается, при  $h_i < 1$  – ослабляется вплоть до полной «непрозрачности», когда  $h_i = 0$ .

При более сложных свойствах препятствий необходимо вводить функциональную зависимость, описывающую прозрачность или ослабление пространства:

$$S_{p,x,y}^o = F_p(x, y), \quad x \in x_p, \quad y \in y_p, \quad (5)$$

где  $F_p(x, y)$  – функция прозрачности или ослабления.

Таким образом, в качестве начальных данных для построения модели пространственного влияния служит двумерный массив, каждый элемент которого – это клетка с заданными начальными параметрами. Объекты на плоскости, будь то источник загрязнения, или же препятствие, могут иметь произвольную форму, на работу клеточного автомата это не оказывает влияние.

В виду того, что на состояние каждой ячейки в данный момент времени влияют лишь состояния окружающих ее ячеек, то используя потактовую технологию построения и визуализации моделей пространственного влияния, легко получить процессы распространения в динамике.

Скорость распространения диффузии моделируется путем изменения времени перехода клетки в новое состояние под действием соседней клетки:

$$V_{ij} = \frac{l_{ij}}{n_{ij}T}, \quad (6)$$

где  $n_{ij}$  – число тактов задержки передачи влияния от  $i$ -ой клетки к соседней  $j$ -клетке,  $T$  – период квантования, задаваемый в зависимости от самой большой скорости диффузии, которая, очевидно будет при  $n_{ij} = 1$ .

Для реализации изложенного метода моделирования разработан программный модуль, расширяющий возможности инструментальной ГИС ArcView. Языком программирования выбран C++, среда разработки MS Visual C++.

Для реализации алгоритма моделирования в программе используются следующие исходные данные: слой объектов влияния; слой объектов препятствий; размеры области расчета ( $n$ ,  $m$ ); шаг координатной сетки. Объекты влияния имеют следующие параметры: местоположение; начальная величина влияния; функция влияния; точность, до которой надо вести расчет ( $\epsilon$ ). Препятствия имеют следующие параметры: местоположение; прозрачность (для использования в будущих реализациях).

Расчет производится по следующему алгоритму: создается массив  $n \times m$  элементов  $A$ ; в массив  $A$  помещаются препятствия; создается копия массива  $A$  – массив  $B$ ; выбирается очередной объект влияния; в массив  $B$  помещается выбранный объект влияния; производится расчет массива  $B$ ; массив  $B$  копируется во временный массив  $C$  по заданному закону объединения влияний; если есть еще объекты влияния, то производится возврат – переход к третьему шагу; результаты копируются в массив  $A$ ; удаляются массивы  $B$ ,  $C$ . Массив просматривается справа налево и сверху вниз. У каждой клетки просматриваются 8 ближайших соседей, на основе их состояния делается вывод о необходимости произвести расчет для текущей клетки. Для корректной работы алгоритма на краю области расчета крайние клетки не рассчитываются или увеличивается размер массива на 1 клетку в каждом направлении. Расчет

продолжается до тех пор, пока происходит изменение состояния ячеек на величину, большую  $\epsilon$ .

Элементарные участки характеризуются следующим набором показателей (параметров): состояние ячейки (рассчитана, не рассчитана, источник, препятствие); величина влияния в данной точке; расстояние до объекта влияния; направление на предыдущую ячейку, от которой передалось влияние. Для повышения точности расчета используется анализ состояния ближайшего окружения текущей ячейки и ячейки, от которой передалось влияние на это окружение. Обозначим текущую ячейку  $T0$ , ячейку от которой передается влияние  $T1$ . Ячейку, послужившую источником воздействия на  $T1$ , обозначим  $T2$ . В общем случае, эти три клетки имеют всего два варианта взаимного расположения – они могут находиться на одной прямой или нет (см. рис.1).

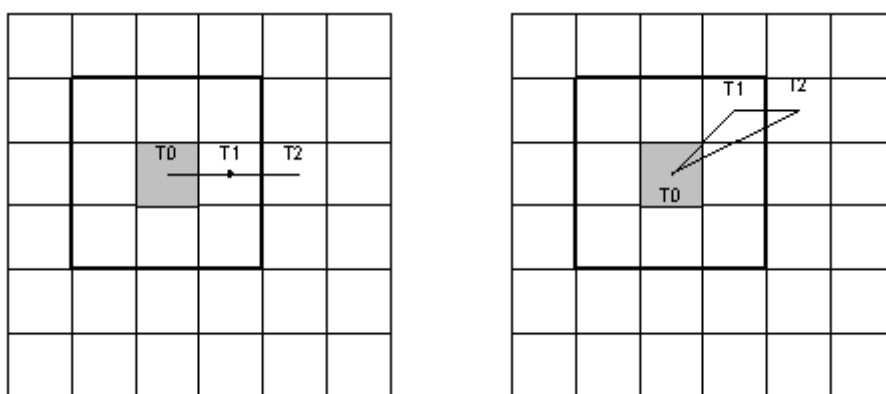


Рис.1. Алгоритм расчёта ближайшего расстояния

Если точки расположены на одной прямой, то никакого улучшения результатов не получается, и в этом случае точка  $T2$  не используется. Если точки не расположены на одной прямой, то из расчета ячейку  $T1$  можно исключить и получить более точный результат.

В качестве примера рассмотрим алгоритм расчета состояния ячейки: просмотр области из 8 соседних клеток; проверка состояния ячеек, выбор ячеек с признаком «рассчитана» или «объект влияния»; из этих ячеек выбирается ячейка  $T1$  с минимальным расстоянием до источника; если рядом нет препятствий, то просматриваются свойства ячейки  $T1$  и направление на



предыдущую ячейку ( $T2$ ); если точки  $T0$ ,  $T1$ ,  $T2$  не находятся на одной прямой, то точка  $T1$  исключается из расчета и расчет производится с использованием расстояния от точки  $T0$  до точки  $T2$ ; во всех остальных случаях расчет проводится от  $T0$  до  $T1$ .

Использование точки  $T2$  позволяет увеличить точность расчетов, но нельзя использовать  $T2$  в непосредственной близости от препятствий, это требование вызвано тем, что возникает эффект прохождения сквозь препятствие.

Текущая версия программы обладает следующими возможностями:

- задание размеров исследуемой области, размер задается в элементарных участках;
- задание размера элементарного участка (размера ячейки);
- расчет областей влияния точечных объектов;
- расстановка, удаление, и перемещение объектов влияния в пределах исследуемой области;
- изменение свойств каждого объекта: начальная величина; радиус действия объекта; модель влияния; момент прекращения расчета ( $\epsilon$ );
- расстановка и удаление точечных и линейных препятствий;
- отображение результатов расчета на экране;
- изменение масштаба изображения;
- сохранение исходных данных;
- сохранение результатов расчета для последующего построения трехмерной поверхности;
- возможна одновременная работа с несколькими моделями.

Разработанный метод позволяет моделировать динамику пространственного распространения влияния физических и социально-экономических разнородных процессов на прилегающую территорию при решении задач размещения предприятий и производственных комплексов.

**Список использованной литературы**

1. Hagerstrand T. Diffusion of Innovation as The Arial Process. L, 1954.
2. Гуриева Л.К. Концепция диффузии инноваций // Инновации.2005. № 4.
3. Тоффоли Т., Марголус Н. Машины клеточных автоматов. М.: Мир, 1991.
3. Гнатюк А.Б. Частотный метод пространственного квантования моделей свойств территории. – Иваново: Вестник ИГЭУ, 2004, Вып. 4.