

**Лебедева Ольга Анатольевна,**  
к.т.н., доцент, Ангарский государственный технический университет,  
e-mail: kravhome@mail.ru

**Тарасова Злата Олеговна,**  
бакалавр, Ангарский государственный технический университет,  
e-mail: zlatovlaska1322@gmail.com

## **РАЗРАБОТКА СИМУЛЯТОРА ГОРОДСКОГО ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМОЙ**

**Lebedeva O.A., Tarasova Z.O.**

## **DEVELOPMENT OF URBAN LAND USE SIMULATOR FOR EFFICIENT TRANSPORT SYSTEM MANAGEMENT**

**Аннотация.** В статье рассматривается процесс разработки типовой модели городского землепользования, так как эффективное планирование и управление транспортной системой требует, как данных о текущих условиях, так и способности прогнозировать функционирование транспортных систем с разными сценариями. В рамках этих задач рассмотрена дискретная модель, основанная на клеточных автоматах.

**Ключевые слова:** транспорт, землепользование, дискретное моделирование.

**Abstract.** The article discusses the process of developing a typical model of urban land use, since effective planning and management of the transport system requires both data on current conditions and the ability to predict the functioning of transport systems with different scenarios. Within the framework of these tasks, we consider a discrete model based on cellular automata.

**Keywords:** transport, land use, discrete modeling.

Городское пространство является одной из самых сложных структур, которые в настоящее время претерпевают изменения, влияющие на качество жизни населения. Этими изменениями необходимо управлять, чтобы сохранить или повысить качество жизни и обеспечить экономическую и экологическую устойчивость [1-6]. Эффективное планирование и управление требуют, как данных о текущих условиях, так и возможности прогнозирования. В этом контексте проект направлен на расширение использования данных дистанционного зонирования для городского планирования путем реализации следующих проектов: создание базы данных об изменениях в землепользовании для репрезентативной выборки; определение ряда показателей городской среды, связанных с устойчивостью; разработки общей модели городской динамики, которая будет способствовать реалистичному исследованию городского пространства при различных сценариях планирования. В этой статье рассмотрим разработку типовой модели городского землепользования. Цель исследования – разработка общей модели подразумевающей, что города на определенном уровне фундаментально похожи и развиваются в результате одних и тех же процессов. Фрактальный анализ моделей землепользования предполагает, что существенные различия между городами в значительной степени обусловлены специфическими граничными условиями. В частности, местная топография, геометрия

транспортной сети и правила планирования, определяют различия между городами. Проект представляет собой проверку этой гипотезы.

Модель динамики городского землепользования для реалистичного отражения требует подхода, отвечающего нескольким критериям. Во-первых, модель должна функционировать с достаточно высоким пространственным разрешением. Во-вторых, содержать адекватное представление о пространственных процессах, определяющих модели землепользования. В-третьих, включать представление соответствующих особенностей ландшафта и правовых ограничений на землепользование. Этими свойствами, обладает модель клеточных автоматов.

Клеточные автоматы – это очень простые динамические пространственные системы, в которых состояние каждой ячейки в массиве зависит от предыдущего состояния ячеек. Такие модели очень эффективны, так как они представляют собой дискретные итерационные системы, которые включают взаимодействие внутри локальных областей, а не между всеми парами ячеек (есть возможность работать с сетками, содержащими сотни тысяч ячеек). Таким образом, может быть достигнуто высокое пространственное разрешение, которое является важным преимуществом при моделировании динамики землепользования и планирования транспортной системы. Клеточный автомат состоит из: евклидова пространства, разбитого на массив одинаковых ячеек; набора дискретных состояний; набора правил перехода, определяющих состояние ячейки как функцию состояний соседних ячеек; дискретных временных шагов с одновременным обновлением всех ячеек.

Клеточные автоматы первоначально разработаны для обеспечения эффективного метода исследования динамических систем. Теперь метод используется в качестве основы для высоко детализированных моделей в конкретных отраслях [7].

Модель на основе клеточных автоматов с ограничениями выглядит следующим образом. Клеточное пространство состоит из прямоугольной сетки квадратных ячеек, каждая из которых представляет площадь из определенного числа квадратных метров. Размер и форма сетки варьируются в зависимости от требований моделируемого города, но чаще составляют менее 500 на 500 ячеек. Сетка может быть больше, но тогда увеличивается длительность времени обработки. Предполагается неоднородное пространство ячеек, которое характеризуется вектором пригодности (по одной пригодности для каждого землепользования, исследуемого в эксперименте). Пригодность определяется как взвешенная сумма или произведение ряда физических, экологических и институциональных факторов, характеризующих каждую ячейку. Они нормализованы до значений в диапазоне от 0 до 1 и представляют присущую ячейке способность поддерживать конкретную деятельность или землепользование. Карты пригодности рассчитываются в геоинформационной системе и импортируются в

среду моделирования. Они остаются постоянными во время моделирования, если пользователь не прервет прогон и не редактирует их вручную. Для этой цели в среде моделирования доступен редактор.

Каждая ячейка связана с вектором факторов доступности (по одному для каждого землепользования). Эти факторы отражают важность доступа к транспортным сетям для различных землепользований или видов деятельности. Транспортные сети представлены центрированными векторами и отображаются наложенными на сетку ячейками. Доступность рассчитывается как функция расстояния от ячейки до ближайшей точки в сети:

$$A_j = \left(1 + \frac{D}{a_j}\right) - 1, \quad (1)$$

где  $D$  – евклидово расстояние до ближайшей ячейки, через которую проходит сеть;  $a_j$  – коэффициент, представляющий важность доступности сети для землепользования  $j$ .

Каждая ячейка связана с набором чисел, представляющих зонирование для видов землепользования в различных периодах. Комбинированный эффект пригодности, доступности и зонирования заключается в том, что каждая ячейка уникальна по своим качествам в отношении возможного использования земли. И именно в этом высокодифференцированном клеточном пространстве развивается динамика самих клеточных автоматов.

Поскольку целью исследования является моделирование городского землепользования, для них используется наиболее подробный уровень классов. Можно выделить шесть классов: автомобильные и железнодорожные сети, аэропорты, места добычи полезных ископаемых, полигоны переработки твердых коммунальных отходов, участки с несельскохозяйственной растительностью и водоемы, которые представляют в модели фиксированные характеристики. Но они влияют на динамику активного землепользования, поскольку в соседстве с ячейкой они могут иметь притягательный или отталкивающий эффект. Пахотные земли, многолетние культуры, пастбища, разнородные сельскохозяйственные угодья, леса, кустарники, участки с редкой растительностью и водноболотные угодья – являются пассивными характеристиками, которые участвуют в динамике землепользования, но не определяют экзогенный спрос на землю, а появляются или исчезают на активных функциях. Такие характеристики, как: городское землепользование (плотность жилой застройки, средняя плотность, непрерывная и прерывистая разреженность; промышленные и коммерческие районы, государственные и частные предприятия, портовые районы и заброшенные земли) определяются спросом на землю, генерируются экзогенно для клеточного автомата, в ответ на рост городской территории. Строительная площадка представляет собой переходное состояние между одной функцией и другой. Фундаментальная идея клеточных автоматов состоит в том, что состояние ячейки в любой момент времени зависит от состояний ячеек ее окрестно-

стей. Таким образом, эффект соседства должен быть рассчитан для каждого из функциональных состояний, в которые может быть преобразована ячейка.

В рассматриваемой модели эффект соседства представляет собой эффекты притяжения и отталкивания различных видов землепользования. Как правило, более удаленные клетки будут иметь меньший эффект; положительный вес ячейки сам по себе (вес нулевого расстояния) представляет собой эффект инерции из-за неявных и денежных затрат на переход от одного вида землепользования к другому. Таким образом, каждая ячейка в окрестности получит вес в соответствии с ее состоянием и расстоянием от центральной ячейки. В частности, эффект соседства рассчитывается как

$$N_j = \sum x \cdot \sum d \cdot W_{kxd} \cdot I_{xd}, \quad (2)$$

где  $W_{kxd}$  – весовой параметр, применяемый к землепользованию в точке  $k$  в зоне расстояния  $d$  района;  $I_{xd}$  – дельта-функция Дирака ( $I_{xd} = 1$ , если ячейка занята землепользованием  $k$ ; в противном случае,  $I_{xd} = 0$ ).

Вектор переходных потенциалов (по одному потенциалу для каждой функции) рассчитывается для каждой ячейки на основе пригодности, доступности, зонирования, а затем по детерминированному значению присваивается стохастическое возмущение (с использованием модифицированного распределения экстремальных значений), так что большинство значений мало подвержены изменениям, но некоторые из них изменяются значительно:

$$P_j = v \cdot A_j \cdot S_j \cdot Z_j \cdot N_j, \quad (3)$$

где  $P_j$  – потенциал ячейки для землепользования  $j$ ;  $v$  – масштабируемый член случайного возмущения;  $A_j$  – доступность ячейки относительно улично-дорожной сети  $j$ ;  $S_j$  – внутренняя пригодность ячейки для землепользования  $j$ ;  $Z_j$  – статус зонирования ячейки для землепользования  $j$ ;  $N_j$  – влияние соседних ячеек для землепользования  $j$  [7].

Правило перехода сводится к следующему: чтобы перевести каждую ячейку в состояние, для которого она имеет наибольший потенциал, с учетом ограничения, согласно которому количество ячеек в каждом состоянии должно быть равно количеству, требуемому на этой итерации. Таким образом, все ячейки ранжируются по наивысшему потенциалу. Когда достигнуто достаточное количество ячеек конкретного землепользования, этот вариант впоследствии игнорируется, в результате некоторые клетки находятся не в том состоянии, для которого они имеют наибольший потенциал. Каждая ячейка подчиняется этому алгоритму перехода на каждой итерации, хотя большинство ячеек остается в своем текущем состоянии. Когда происходит переход в другое состояние, происходит задержка в одну итерацию.

Требования к землепользованию генерируются экзогенно по отношению к модели, поскольку они в значительной степени отражают рост города, а не локальную конфигурационную динамику. Таким образом, в настоящей модели за-

просы функции землепользования считываются из файла на каждой итерации. График спроса для каждого землепользования может быть создан с помощью инструмента сплайна.

При апробации модели были отмечено, что калибровки дают положительные результаты, учитывая небольшое количество данных, используемых для симуляции. Для более полного анализа возможно повысить качество результатов моделирования за счет добавления пригодности, и зонирования. Возможно включение дополнительных данных, относящихся к структуре городского землепользования, для обеспечения более точных оценок будущих условий при различных сценариях.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Антонов, Д. В.** Основные принципы развития транспортных систем городов / Д. В. Антонов, О. А. Лебедева // Вестник Ангарской государственной технической академии. 2014. № 8. С. 149-155.

2. **Крипак, М. Н.** Оценка состояния улично-дорожной сети крупного города / М. Н. Крипак, О. А. Лебедева // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 3 (51). С. 171-174.

3. **Лебедева, О. А.** Транспортная инфраструктура как основополагающий фактор эффективного функционирования экономики страны / О. А. Лебедева, Ю. О. Полтавская, З. Н. Гаммаева, Т. В. Кондратенко // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. 2018. Т. 1. № 15. С. 125-130.

4. **Шаров, М. И.** Влияние транспортного зонирования на функционирование маршрутной сети города // М. И. Шаров, О. А. Лебедева / Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2019. № 2 (62). С. 196-202.

5. **Лебедева, О. А.** Анализ проектирования транспортных зон на основе моделирования сети / О. А. Лебедева // Вестник Ангарского государственного технического университета. 2019. № 13. С. 172-177.

6. **Штоцкая, А.А.** Оценка транспортной подвижности населения на основе дезагрегированных моделей / А.А. Штоцкая, А.Ю. Михайлов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 5 (124). С. 199-207.

7. **White, R.** Developing an urban land use simulator for European cities / R. White, G. Engelen, I. Uljee, C. Lavallo, D. Erlich // Proc. of the 5th EC-GIS Workshop, Stresa, Italy, 1999.