

технического университета. 2018. № 12. С. 196-198.

5. Лебедева О.А. Учет транспортной работы с помощью бортовых контроллеров и спутниковых навигационных систем / О.А. Лебедева, Д.В. Антонов / Сборник научных трудов молодых ученых и студентов. г. – Ангарск: Изд – во АГТА, 2015. - С.124-126.

6. Лебедева О.А. Основные принципы развития транспортных систем городов / О.А. Лебедева, Д.В. Антонов / Вестник Ангарской государственной технической академии. – Ангарск: Изд-во АГТА, 2014.- С.149-155.

7. Полтавская Ю.О. Надежность как показатель эффективного функционирования транспортной системы. В сборнике: Транспорт России: проблемы и перспективы - 2018 Материалы международной научно-практической конференции. 2018. С. 206-209.

8. Choi, K., and T. J. Kim. 1992. An integrated transportation planning model with GIS and expert systems. Paper presented at the 34th Annual Meeting of the Association of Col-

legiate Schools of Planning, 30 Oct.- 1 Nov., Columbus, Ohio.

9. Marble, D. F. 1987. Geographic information systems: An overview. In Geographic Information Systems for Resource Management: A Compendium, ed. W. J. Ripple. Falls Church, Virginia: American Society of Photogrammetry and Remote Sensing and American Congress of Surveying and Mapping.

10. Ding, C., K. Choi, and T. J. Kim. 1993. GIS-based traffic analysis zone design. Paper presented at the Third International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management, 23-25 July, Atlanta, Georgia.

11. Patterson, P. E. 1990. An evaluation of the capabilities and integration of aggregate transportation demand models with GIS technologies. In Proceedings of the 1990 Annual Conference of the Urban and Regional Information Systems Association, ed. R. Gaudet. Boston, Massachusetts: URISA.

12. O'Neil, W. A. 1991. Developing optimal transportation analysis zones using GIS. ITE Journal 61:33-36.

УДК 656.02

Лебедева Ольга Анатольевна,
к.т.н., доцент кафедры «Управление на автомобильном транспорте»,
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
тел.: 89526326611, e-mail: kravhome@mail.ru

АНАЛИЗ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ЗОН НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЕТИ

Lebedeva O.A.

ANALYSIS OF DESIGNING TRANSPORT ZONES BASED ON NETWORK MODELING

Аннотация. В статье рассматривается процедура проектирования транспортных зон на основе моделирования сети. Среди наиболее эффективных методов кластерного анализа для получения максимальной однородности внутри каждой зоны выделяют – агломерационный и итеративный разделительный. Зонирование проводится с помощью дискретизации района исследования в зоне движения. Количественная оценка уровней агрегирования социально-экономических и демографических данных производится путем применения методологии зонирования, необходимой для проектирования транспортных зон.

Ключевые слова: транспорт, моделирование, мобильность, транспортное зонирование.

Abstract. The article considers the analysis of the design of transport zones based on network modeling. Among the most effective methods of cluster analysis to obtain maximum homogeneity within each zone are distinguished - agglomeration and iterative separation. Zoning is carried out by sampling the study area in the movement zone. A quantitative assessment of the aggregation levels of socio-economic and demographic data is carried out by applying the zoning methodology necessary for the design of transport zones.

Key words: transport, modeling, mobility, transport zoning.

В процессе активного развития транспортной инфраструктуры на первый план выходят вопросы мобильности, которая представляется как поездка между двумя точками. Детализированный анализ этих поездок достаточно сложен, но используется при моделировании транспортной системы. Системный подход к изучению мобильности, предусматривает моделирование транспортных зон за два последовательных этапа: выделение района исследования и его последующая дискретизация в зонах движения [1-5].

Дискретизация территории в зонах и направление поездок по зонам можно реализовать, используя моделирование, согласованное с уровнем анализа, который аналитически связан с доступными вычислительными ресурсами.

В сетевой модели каждая зона представлена одной точкой (центроидой зоны). В ней указаны географические положения и направления всех поездок, которые создают транспортные потоки между зонами, а также физические, демографические и социально-экономические переменные, используемые в системе. В сети отмечается неполная оценка количества поездок и транспортных потоков в районе исследования, из-за агрегирования пунктов назначения элементарных поездок по зонам при анализе системы, поскольку в сетевых моделях внутризональные исключения недопустимы, что оказывает влияние на процесс планирования.

Модель распределения рассматривает наличие множества элементарных пунктов назначения в зоне исследования посредством введения переменной «размер» ($\ln M_d$). В этой модели одна зона (d) рассматривается как составная альтернатива выбора. Предполагается, что формулировка систематической полезности зоны (V_d), будет зависеть от числа возможных пунктов назначения, находящихся в зоне:

$$V_d = \sum_i \beta_j X_{id} + \ln M_d, \quad (1)$$

где M_d – количество элементарных пунктов назначения зоны; X_{jd} – атрибут j -й зоны.

Таким образом, число, форма и однородность социально-экономических характеристик (способность генерировать и привлекать поездки) оказывают влияние на результаты анализа. В статье проведена количественная оценка воздействия различных уровней агрегирования социально-экономических и демографических данных,

полученных при моделировании транспортной системы, путем предложения методологии для расчета номера зоны и агрегирования базовых пространственных единиц в однородные зоны; методология зонирования, и его влияние на результаты модели, методология, принятая для проектирования транспортных зон.

Процедура зонирования территории состоит из двух последовательных этапов:

- определение уровня пространственной агрегации социально-экономических характеристик (определение количества зон);
- установление формы и размеров зон, соответствующих определенному уровню пространственной агрегации.

Практика показывает, что для определения количества зон формальных методов определения не существует. Их характеристики должны определяться на эмпирической основе в каждой конкретной ситуации.

В целом, количество зон внутри области исследования тесно связано с уровнем анализа. В краткосрочном планировании – количество зон, которые необходимо идентифицировать, будет высоким и потребует более детального определения характеристик транспортной сети. При стратегическом анализе принимается меньшее количество зон, что согласуется с моделью.

Отмечена тенденция увеличения коэффициентов корреляции связанных с уровнем агрегации участков, изучены ошибки, которые могут повлиять на анализ, основанный на совокупности пространственных данных.

Влияние агрегирования социально-экономических данных в зоны движения с использованием моделей гравитационного спроса, показало, что количество несиммулированных внутризональных поездок зависит от количества зон. Существует значение числа зон, в которых вычисленные результаты довольно различны.

Чтобы физически разграничить зоны, существуют общепринятые критерии:

- однородность социально-экономических характеристик;
- компактность форм;
- соблюдение административных ограничений (участков переписи, муниципальных границ);

- учет физических (географических) разделителей, расположенных на территории (железнодорожные пути, реки)
- исключительность.

Процедуры для проектирования зон посредством агрегирования на основе определенных критериев многочисленны и обычно следуют кластерному анализу.

Для объединения двух зон их смежность является необходимым, но не достаточным условием. При определении зон движения сложно добиться того, чтобы требования однородности и пространственной смежности совпадали.

Выделяют три основных метода агрегации:

- иерархический эвристический подход;
- статистический подход;
- объединенная географической информационной системы (ГИС) и статистических подходов.

Среди наиболее эффективных методов кластерного анализа для получения максимальной однородности внутри каждой зоны выделяют агломерационный и итеративный разделительный. Метод проектирования зон движения, учитывая достигаемый уровень пространственной агрегации, является гибридом обоих. Оба метода основаны на измерении сходства между основными пространственными единицами. Евклидово расстояние и коэффициент корреляции являются наиболее часто используемыми мерами подобия.

Рассмотрим агломерационную методологию. Евклидово расстояние – это мера подобия:

$$d_{ij} = \left[\sum_r w^r (X_i^r - X_j^r)^2 \right]^{0,5} \quad (2)$$

где X^r – социально-экономические атрибуты каждой пространственной единицы, w – вес каждого атрибута.

Методология сформулирована из следующих этапов [6, 7, 8]:

1. Создание информационной системы, которая будет поддерживать операции агрегации.
2. Выделение числа зон n , каждое из которых характеризуется определенным числом зон m .
3. Создание модели поставки.
4. Расчет n матриц корреспонденций, по одной на каждое определенное зонирование.

5. Присвоение спроса на поездки, определенного для каждой зоны.

6. Сравнение и оценка числовых результатов в сочетании с разработкой методологии планирования количества зон.

Рассмотрим обозначения, используемые в модели:

i, j – две общих пространственной единицы, локализованные в области исследования;

X_i^k – k – й атрибут i -ой пространственной единицы;

d_{ij} – евклидово расстояние от i и j ;

β – общий вес, заданный для атрибутов, используемых для агрегирования в зоны;

$G = G(N, L)$ граф, связанный с транспортной сетью;

N – множество узлов сети;

L – множество звеньев сети = $\{(a, b)\}$ при $a, b \in N$;

c_l – стоимость транспортного звена:

$$c_l = \alpha_1 t_{runl} + \alpha_2 t_{wl}$$

α_y – общий коэффициент однородности потока;

C – вектор стоимости пути;

A – матрица инцидентности;

C^{NA} – вектор стоимости пути без учета вектора пути потока;

f – вектор потока;

G_s – степень насыщенности;

d_{od} – спрос потока от пункта отправления o до пункта назначения d ;

m – график работы;

s – время, затраченное на поездку;

k – путь следования;

$m_C(s)$ – среднее количество поездок до объезда s ;

N_o – количества пользователей в зоне o .

Рассмотрим географические информационные системы (ГИС). Их общими признаками является структура, образованная перекрывающимися слоями. С одним из них связан только уровень информации. Первый слой, на котором основаны все остальные, содержит социально-экономическую информацию о районе исследования и подразделяется на участки переписи. Их разработка с помощью процедур агрегирования позволяет определить социально-экономические характеристики зон, необходимые для моделей спроса.

Атрибуты, доступные из данных переписи, включают в себя: направление занято-

сти (промышленный сектор, государственные служащие, индивидуальные предприниматели), постоянное население старше 14 лет, состав семей, места обучения и приложения труда.

Кроме того, для каждого зонирования подпрограмма ГИС позволяет определять и связывать с элементами некоторые физические характеристики (площадь или географические координаты центроидов зон).

Второй слой содержит картографию исследуемой территории с географической привязкой, которая позволяет найти физические разделители (железнодорожные пути, реки, улично-дорожную сеть). На третьем и четвертом уровнях представлены соответственно график сети и дискретизация зоны исследования.

Для выполнения общего зонирования и процедуры кластеризации используется построение n систем зонирования, каждая из которых характеризуется числом m зон.

Вначале рассматривается вариант, характеризующийся большим количеством зон, посредством процедуры агрегации блоков, основанной на единственном критерии физических разделителей. На последующих этапах каждая зона делится на более мелкие. Критерий, который следует использовать при агрегировании данных переписи на всех этапах, должен гарантировать создание зон, которые показывают характеристики однородности по отношению к еще одному атрибуту. Критерий компактности оценивается визуально с использованием технологии ГИС. С этой целью используется процедура кластерного анализа $K - \text{средних}$. Этот метод оценки дискретности между зонами по атрибутам использует евклидово расстояние:

$$d_{ij} = \left[\sum_k w^k (X_i^k - X_j^k)^2 \right]^{0,5} \quad (3)$$

Атрибут X_i^k учитывает: количество населения, количество занятого населения, из них постоянного населения, площадь, географические координаты. Количество населения напрямую связано с числом индивидуального транспорта, географические координаты необходимы для оценки смежности зон.

Каждому атрибуту X_i^k соответствует вес β_i , исходя из его относительной важности, далее применяется процедура стандартизации, для того чтобы размер каждого атрибута не влиял на результаты.

Следовательно, выражение расстояния станет:

$$d_{ij} = \left[\beta_1 (Z_{1j} - Z_{1i})^2 + \beta_2 (Z_{2j} - Z_{2i})^2 + \beta_3 Z_{3j} - Z_{3i} + \beta_4 Z_{4j} - Z_{4i} + \beta_v X_j - X_i + Y_j - Y_i \right]^{20,5} \quad (4)$$

где Z_1 стандартизированная переменная постоянного населения ($\beta_1 = 0,15$); Z_2 стандартизированная переменная работающего населения ($\beta_2 = 0,15$); Z_3 стандартизированная переменная численности семей ($\beta_3 = 0,1$); Z_4 стандартизированная переменная площади ($\beta_4 = 0,05$); X_j, Y_j стандартизированные картографические координаты центра области ($\beta_v = 0,55$).

Заданные значения β представляют гипотезу, в которой критерий смежности является основным. Результаты, полученные с принятием этих значений, соответствуют территориальной реальности. Моделирование вариантов зонирования проводилось для различного количества зон. Два случая показаны на рисунке 1 (а, б).

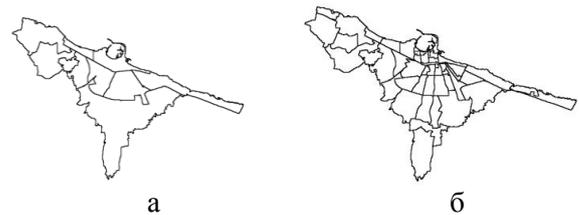


Рисунок 1 – Варианты транспортного зонирования: а – для 10 зон; б – для 50 зон.

Для моделирования системы транспортного обеспечения необходимо проанализировать и сравнить варианты зонирования, построить модель, которая считается постоянной за счет изменения уровня дискретизации территории и вектора спроса d , переменной с количеством зон.

Система относительно улично-дорожной сети моделируется синхронной сетью. График, связанный с дорожной сетью, строится с помощью программного обеспечения ГИС с получением картографии. Этот инструмент позволяет осуществлять выбор транспортных инфраструктур, которые играют важную роль в соединении исследуемых внешних зон движения. ГИС-технология позволяет связывать с каждым элементом графика всю информацию, необ-

ходимую для описания сети: идентификационные коды, функции стоимости, потоки.

Модель перегруженной сети формально выражается отношением, которое связывает стоимость потока, а поток на определенном участке с потоками всего пути:

$$C = A^T c(AF) + C^{NA} \quad (5)$$

$$f = A \times F \quad (6)$$

$$c_l = c_l(f) \quad (7)$$

В модели неаддитивные затраты C^{NA} не рассматриваются, а в качестве функции стоимости $c_l = c_l(f)$. Внутренние центроиды и соответствующие показатели являются переменными с количеством зон, рассматриваемых в каждой симуляции. Центроиды вне исследуемой области, в количестве констант для каждой имитации зонирования, расположены около участков улично-дорожной сети.

Оценка транспортных потребностей и привязка к сети происходит путем применения вектора спроса d , переменного для каждого варианта моделирования, который оценивается с помощью модели частичной доли, подверженной риску в результате применения четырех подмоделей: модели выбросов, модели распределения, модели модального разделения и модели выбора пути: $d_{od}(s, m, k) = d_o(s, h) [SE, T] p(d/osh) [SE, T] p(m/odsh) [SE, T] p(k/modsh) [SE, T]$ (8)

Для модели эмиссии используется описательная модель:

$$d_o(s) = \sum_c m_c(s) \times N_o(C) \quad (9)$$

Для распределительных пешеходных и транспортных потоков используются модели логистической регрессии:

$$p(d/os) = \exp(\alpha V_d) / \sum_d \exp(\alpha V_d) \quad (10)$$

$$p(m/ods) = \exp(\alpha V_m) / \sum_m \exp(\alpha V_m) \quad (11)$$

В обоих случаях V_d – линейная комбинация атрибутов, свойственных зоне назначения d или моде m , на основе параметров γ_k :

$$V = \sum_k \gamma_k X_k \quad (12)$$

Для модели выбора пути используется модель пробит-регрессии.

Результатом применения четырехступенчатой модели является вектор спроса.

Оценка транспортных потоков на каждом звене сети и показатели производительности сети представлены как общие затраты ($TC = C^T F$), средние затраты ($AC = C^T F / l^T F$), индекс перегрузки PCP ($l_c = \sum_l (G_{sl} \times f_l) / \sum f_l$).

Таблица 1

Показатели производительности сети

Число зон	10	20	50
Общие затраты, час	6500	8430	2500
Средние затраты, час	4280	5682	417
Индикатор перегрузки	88,7	80,4	50,3

В таблице 1 приведены полученные в результате тестирования модели показатели производительности сети в зависимости от количества зон. Анализ показывает порог числа зон, за пределами которого значения индикаторов производительности сети обеспечивают стабильность результатов, включенных в диапазон $\pm 20\%$ вокруг среднего значения между максимумом и минимумом результатов, полученных при моделировании. Изменчивость результатов согласуется со стохастичностью используемой модели назначения. Кроме того, результаты демонстрируют согласованность с другим анализом, проведенным в случае внегородских сетей с оценкой спроса, выполненной с помощью гравитационной модели.

Дискретизация территории и агрегирование пунктов отправления и назначения элементарных поездок в центроиде зоны оказывают влияние на моделирование транспортной системы. В работе разделение на зоны проанализировано с помощью различных уровней дискретизации (от 10 до 50 зон) района исследования в зоны движения. Совокупность моделирования стала возможна благодаря использованию программного обеспечения ГИС, которое позволяет управлять, визуализировать, обобщать и деагрегировать элементарную информацию как о социально-экономических характеристиках территории, так и об элементах транспортной системы.

Построения различных зон для каждого исследуемого уровня осуществлялись на основе кластерного анализа с использованием метода K – средних.

Оцененные потоки трафика (veh/h) на каждом звене сети позволяют рассчитать показатели сети: общую стоимость, среднюю стоимость, индекс перегрузки PCP.

Анализ показывает порог числа зон, за пределами которого значения индикатора сети обеспечивают стабильность результатов, включенных в диапазон $\pm 20\%$, от среднего значения между максимумом и мини-

мумом. Индивидуализация порога моделирования системы даст возможность значительно сэкономить время разработки, сократить затраты на анализ. С этой целью анализ, распространенный на другие города малого, среднего и большого измерения, может предоставить полезную информацию. Кроме того, для индивидуализации порогового

уровня можно определить отношения между уровнем дискретизации территории и социально-экономическими величинами, такими как численность постоянного населения, демографическая плотность, площадь изучаемой территории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

2. Лебедева О.А. Транспортная инфраструктура как основополагающий фактор эффективного функционирования экономики страны / О.А. Лебедева / Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. 2018. С. 125-130.

3. Гозбенко В.Е., Иванков А.Н., Колесник М.Н., Пашкова А.С. Методы прогнозирования и оптимизации транспортной сети с учетом мощности пассажира и грузопотоков. Депонированная рукопись № 330-В2008 17.04.2008.

4. Лебедева О.А. Основные принципы развития транспортных систем городов / О.А. Лебедева, Д.В. Антонов / Вестник Ангарской государственной технической ака-

демии. – Ангарск: Изд-во АГТА, 2014.- С.149-155.

5. Полтавская Ю.О. Надежность как показатель эффективного функционирования транспортной системы. В сборнике: Транспорт России: проблемы и перспективы - 2018 Материалы международной-научно-практической конференции. 2018. С. 206-209.

6. Bennion Wayne, M. And O'Neill, Wende A. Building Transportation Analysis Zones Using Geographic Information Systems. Transportation Research Record # 1429, pp. 49-56.

7. Binetti M.G. (1996) Efficacia ed efficienza di algoritmi per l'assegnazione di equilibrio stocastico AIRO '96 Perugia 16-20 settembre 1996.

8. Cascetta E. (1998) Teoria e Metodi dell'Ingegneria dei Sistemi di Trasporto Ed. UTET.