

## *Литература*

1. Ваксман, С.А. Эволюция стадийности планирования транспортных систем городов за последние 50 лет / С.А. Ваксман, А.А. Цариков // Социально-экономические проблемы развития и функционирования транспортных систем городов и зон их влияния / материалы XXI Международной (двадцать четвертой Екатеринбургской) науч.-практ. конф. – Екатеринбург: Изд-во АМБ, 2015. – с. 18–25.

2. Кегамян, Р.П. Проект организации движения (ПОД) – его истоки, смысл и содержание / Р.П. Кегамян // Схемы и проекты организации движения в городах в условиях самоуправления территорий / Тезисы докладов науч.-практ. семинара. – Свердловск: «Комвакс», 1991. – С. 27–21.

*Окончательно поступила 01.02.2017 г.*

**УДК 656.11: 519.853.3**

### **МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЕМ ГОРОДА: ТРАНСПОРТНАЯ СИСТЕМА И ТЕРРИТОРИАЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ**

**М.Е. Корягин**

*Городские транспортные системы в развивающихся странах сталкиваются с множеством проблем. Основной из которых является ограниченность свободного пространства для развития транспортной инфраструктуры в условиях роста уровня автомобилизации. В статье представлены математические модели управления территорией города, общественным транспортом и выбором способа передвижения. На основе этих моделей сконструирована теоретико-игровая модель позволяющая найти равновесие между интересами участников транспортной системы. На численном примере показаны тенденции изменения транспортных систем в развивающихся и развитых странах.*

*Urban transport systems in developing countries face many problems. The main of which is the limited space for the development of transport infrastructure on the condition of rising levels of motorization. The article presents a mathematical model of urban planning and public transport management on condition travel mode choice. For balance searching*

*between the interests of the transport system participants the game-theoretic model is designed. The numerical example illustrates the trend in transport systems in developing and developed countries.*

Оптимизация городской транспортной системы является одной из важнейших социально-экономических и экологических проблем последних десятилетий. Сложность транспортной системы обусловлена тем, что процесс перевозки связан с множеством проблем, затрагивающих различные сферы общества. Наиболее важным вопросом является взаимное влияние пассажиров и городской транспортной системы.

В настоящее время основной целью многих исследований является поиск моделей устойчивого развития городов, в частности, модели устойчивой мобильности населения. Вучик [1] выделяет четыре уровня транспортного планирования, где первый уровень описывает взаимодействие транспортной системы с другими аспектами города (экономика, экология, расселение, социальные процессы и т.д.). Территориальное и транспортное планирование сложно интегрировать в общую модель, так как они используют слишком разные инструменты и индикаторы [8]. Поэтому математические модели интеграция территориальное и транспортное планирование по-прежнему весьма редко встречаются [5].

На практике решение проблемы зависит от профессионализма проектировщиков, которые используют имитационное моделирование и локальные оптимизационные модели. В качестве примера можно представить постулат Льюис-Mogridge [19], который утверждает, что чем больше дорог построено, тем больше трафика генерируется для заполнения этих дорог. Таким образом, в настоящее время процесс городского планирования требует сокращения использования территории под транспортную инфраструктуру [18].

Развивающиеся страны сталкиваются с острыми проблемами, которые связаны с увеличением темпов автомобилизации [2]. Транспортная инфраструктура не развивается так быстро, – обычно в российских городах под транспортную инфраструктуру выделено менее 10 % территории против 20–35 % в развитых странах [9].

#### ***Модель управление городской транспортной системой***

Городская транспортная система является управляемой со стороны властей, пассажиров и различных компаний, которые могут

изменять свои решения. Таким образом, транспортные ученые используют теорию игр для описания различных интересов участников городской транспортной системы. Например, модель выбора маршрута передвижения Браеса [10], описывает конфликты интересов среди водителей автомобилей. Игровая модель выбора способа передвижения была описана в [17]. Сочетание выбора маршрута и парковки выбор представлена в [3].

В задаче оптимизации парковочного пространства [4] учитывался выбор способа передвижения, но не рассматривалось влияние этого выбора на формирование пробок. Модель [20] позволяет оптимизировать размер парковочного пространства и пропускной способности дорог для нахождения социального оптимума.

### *Содержательная постановка задачи*

Рассмотрим модель города, состоящего из трех районов, которые расположены на одной линии. Территория каждого района распределяется среди жилых районов, торговых и промышленных комплексов. Но эти объекты не занимают всю территорию (рисунок 1), оставшееся пространство используется для транспортных сетей (дорог и парковок) и зеленых насаждений (для охраны окружающей среды).



**Рисунок 1 – Модель использования территории**

Когда автомобильный трафик фиксирован, население выигрывает от увеличения пропускной способности дорог и парковок, а также от зеленых насаждений (рисунок 1). То есть увеличение ширины дорог снижает риск возникновения заторов, сокращает время поездок и уменьшает выбросы выхлопных газов. Трудность заключается в том, что район ограничен и невозможно одновременно расширить места для стоянки, дороги и зеленых насаждений.

Таким образом, решение проблемы рационального территориального планирования является чрезвычайно сложным для большинства городов. Постановка задачи, рассматриваемой в этой

статье, позволяет найти равновесное распределение территории района города, так как найти оптимального решения для всего города не представляется возможным.

Модель города включает жилой, центральный и промышленный район. В жилом районе 1 нет парковки из-за отсутствия мест при-тяжения. Промышленный район 3 не нуждается в дополнительных зеленых насаждениях. Центральный район 2 состоит из жилых и торговых объектов, а также мест приложения труда.

Матрица корреспонденций в данной модели фиксирована, но каждый пассажиропоток может выбрать способ передвижения между общественным и личным транспортом. Потоки внутри каждого района не включены в модель, так как объекты находятся в нескольких минутах ходьбы. Также рассмотрен только утренний час пик – передвижение пассажиров из жилых районов (1, 2) в места приложения труда (2, 3). Следовательно, у нас есть только 3 пассажиропотока, каждый из них пытается найти оптимальную вероятность использования личного транспорта.

Проблема территориального планирования решается индивидуально для каждого района. Районы должны использовать территорию так, чтобы найти лучший способ для удовлетворения потребностей населения этого района. Общественный транспорт также должен найти баланс между транспортными расходами и интересами пассажиров.

Наличие трех типов участников (3 пассажиропотока, 3 района и общественный транспорт) приводит к необходимости построения теоретико-игровой модели с 7 игроками.

### ***Математическая модель***

Основные параметры модели связаны с каждым районом  $i$ :  $s_i^r$  площадь дорог;  $s_i^p$  площадь парковки;  $s_i^e$  площадь озеленения. Территория города, которая может быть выделена под эти нужды  $s_i$ , поэтому запишем следующее ограничение

$$s_i^r + s_i^p + s_i^e \leq s_i . \quad (1)$$

Пассажиропоток между районами  $i$  и  $j$  –  $\lambda_{i,j}$ . Вероятность использования личного транспорта при передвижении между районами  $p_{i,j}$ . Тогда поток автомобильного транспорта в каждом районе составит

$$\Lambda_1 = \lambda_{1,2}P_{1,2} + \lambda_{1,3}P_{1,3} + \lambda_{2,1}P_{2,1} + \lambda_{3,1}P_{3,1}. \quad (2)$$

$$\Lambda_2 = \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^3 \lambda_{i,j}P_{i,j}. \quad (3)$$

$$\Lambda_3 = \lambda_{2,3}P_{2,3} + \lambda_{1,3}P_{1,3} + \lambda_{3,2}P_{3,2} + \lambda_{3,1}P_{3,1}. \quad (4)$$

Количество мест парковки занятых в каждом районе составит:

$$P_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^3 \lambda_{j,i}P_{j,i}, \quad i = 1, 2, 3. \quad (5)$$

Затраты времени в районе  $i$  на парковку  $T_i^p(s_i^p, P_i)$  и на передвижение по дороге на личном  $T_i^r(s_i^r, \Lambda_i)$  и общественном транспорте  $T_i^t(s_i^r, \Lambda_i)$ . В данной модели общественный транспорт использует выделенные полосы движения, а тариф составляет  $c^t$ .

Общая функция затрат на передвижение на личном транспорте между районами 1 и 2:

$$C_{1,2}^r = c^c(T_1^r + T_2^r + T_2^p) + c_2^p, \quad (6)$$

где  $c^c$  – средняя стоимость времени населения (пассажиро-час);

$c_j^p$  – затраты на парковку.

Описывая воздействие транспорта на окружающую среду, мы должны принимать во внимание различные параметры, такие как влияние транспорта на почву, воздух (включая шум), водоемы, но в первую очередь на здоровье и комфорт населения. Вред окружающей среде, в первую очередь зависит от времени передвижения (включая парковку): чем больше времени теряется (из-за пробок на дорогах и проблем с парковкой), тем больший ущерб наносится городу. Параметр экологического ущерба  $D$  на один автомобиле-час.

Положительное влияние на здоровье и комфортность жизни населения оказывают зеленые насаждения  $E$  на единицу площади.

Таким образом, улучшение экологии (минус означает ущерб) для района 1 составляет

$$Es_1^e - DT_1^r (\lambda_{1,2} p_{1,2} + \lambda_{1,3} p_{1,3} + \lambda_{2,1} p_{2,1} + \lambda_{3,1} p_{3,1}) - DT_2^p (\lambda_{2,1} p_{2,1} + \lambda_{3,1} p_{3,1}). \quad (7)$$

### **Выбор способа передвижения**

Пассажиры пытаются найти оптимальное соотношение между использованием личного и общественного транспорта. В развивающихся странах низкий уровень доходов жителей приводит к увеличению спроса на общественный транспорт (автомобиль позволяет сократить время, но увеличивает стоимость поездки). Стоимость времени населения может быть распределена экспоненциально [15] или равномерно [11], хотя обычно для описания выбора способа передвижения используют логит-распределение, которое дает возможность учесть особенности пассажиров [7, 14, 16].

Представленная в статье логит модель описывает влияние разности времени передвижения  $\Delta t$  и стоимости проезда  $\Delta c$  на вероятность выбора личного транспорта для передвижения автомобиля:

$$p^*(\Delta t, \Delta c) = \frac{1}{1 + \exp(a_0 + a_t c^e \Delta t + a_c \Delta c)}. \quad (8)$$

Целевая функция для пассажиропотока описывает отклонение переменной от значения логит функции [14, 16]:

$$G(p) = (p - p^*(\Delta t, \Delta c))^2 = \left( p - \frac{1}{1 + \exp(a_0 + a_t \Delta t + a_c c^e \Delta c)} \right)^2 \rightarrow \min_p. \quad (9)$$

### **Время парковки**

Время на парковку автомобиля зависит от емкости парковки и потока автомобилей желающих припарковаться. Обычно время парковки описывается стандартной моделью Bureau of Public Roads (BPR) [3].

$$t = t^0 + \alpha \left( \frac{q}{q_{\max}} \right)^\beta . \quad (10)$$

где  $t^0$  – минимальное время паркования;

$q_{\max}$  – емкость парковки;

$q$  – спрос на парковку;

$\alpha$  и  $\beta$  дополнительные параметры. У каждой парковки параметры принимают различные значения, т.е. зависят от района  $i$ :

$$T_i^p(s_i^p) = t_i^0 + \alpha_i \left( \frac{\gamma_i P_i}{s_i^p} \right)^{\beta_i} . \quad (11)$$

где  $\gamma_i$  – средняя площадь одного парковочного места.

### **Время передвижения**

Исследователи предпочитают использовать простые подмодели для создания общей модели. Обычно для времени передвижения используется BPR [3, 4, 7] или модель Гринберга [12]. Время в пути в этих моделях зависит от отношения интенсивности движения к пропускной способности дорог.

В настоящей статье используется классическая формула Гриншилдса [13], которая также является частным случаем модели Гринберга. В своей классической форме, эта модель описывает зависимость между скоростью и плотностью потока, из которой легко получить формулу времени передвижения [15].

$$t = \frac{2L}{v_0 + \sqrt{v_0^2 - \frac{4v_0\lambda}{\rho_j}}} , \quad (12)$$

где  $L$  – длина дороги;

$v_0$  – максимальная скорость;

$\lambda$  – интенсивность потока транспорта;

$p_j$  – пропускная способность дороги. С учетом различных параметров для каждого района получим время передвижения:

$$T_i^r(s_i^r) = \frac{2L_i}{v_0 + \sqrt{v_0^2 - \frac{4\delta v_0 \Lambda_i}{s_i^r}}}, \quad (13)$$

где  $L_i$  – длина дороги в районе  $i$  и  $\delta$  площадь дороги занимаемая одним автомобилем.

### *Политика района города*

Качество жизни в районе зависит от времени передвижения населения ( $T_i$ ). Общее время передвижения для района 1 состоит из четырех слагаемых (на общественном и личном транспорте между районами 1 и 2, 1 и 3):

$$\begin{aligned} T_1(s_1^r) = & (T_1^t + T_2^t + t_w) \lambda_{1,2} (1 - p_{1,2}) + (T_1^t + T_2^t + T_3^t + t_w) \lambda_{1,3} (1 - p_{1,3}) + \\ & + (T_1^r(s_1^r, \Lambda_1) + T_2^r(s_2^r, \Lambda_2) + T_2^p(s_2^r, P_2)) \lambda_{1,2} p_{1,2} + \\ & (T_1^r(s_1^r, \Lambda_1) + T_2^r(s_2^r, \Lambda_2) + T_3^r(s_3^r, \Lambda_3) + T_3^p(s_3^r, P_3)) \lambda_{1,3} p_{1,3}. \end{aligned} \quad (14)$$

Целевая функция района 1 включает в себя общие затраты времени, ущерб окружающей среде от автомобилей и польза от зеленых насаждений.

$$\begin{aligned} F_1(s_1^r) = & D(\lambda_{1,2} p_{1,2} + \lambda_{1,3} p_{1,3}) T_1^r(s_1^r, \Lambda_1) - \\ & - E(s_1 - s_1^r) + c^c T_1(s_1^r) \rightarrow \min_{s_1^r}. \end{aligned} \quad (15)$$

Целевая функция для района 2 также учитывает площадь парковки:

$$F_2(s_2^r, s_2^p) = D(\lambda_{1,2}p_{1,2} + \lambda_{1,3}p_{1,3} + \lambda_{2,3}p_{2,3})F_2^r(s_2^r, \Lambda_2) + c^c T_2(s_2^r, s_2^p) + D\lambda_{1,2}p_{1,2}T_2^p(s_2^p, P_2) - E(s_2 - s_2^r - s_2^p) \rightarrow \min_{s_2^r, s_2^p}. \quad (16)$$

В районе 3 нет жилых кварталов, поэтому экологический аспект не учитывается:

$$F_3(s_3^r, s_3^p) = c^c T_3(s_3^r, s_3^p) \rightarrow \min_{s_3^r, s_3^p}. \quad (17)$$

### **Общественный транспорт**

Третий тип игрока представлен общественным транспортом. Целевой функцией общественного транспорта являются совокупные расходы на общественный транспорт и потери времени пассажиров. Стратегией является средний интервал движения общественного транспорта.

$$H = c^c \sum_{i=1}^3 \sum_{j=i+1}^3 \left( \sum_{k=i}^j T_k^t + t_w \right) \lambda_{i,j} (1 - p_{i,j}) + \frac{a}{2t_w} \rightarrow \min_{t_w}, \quad (18)$$

где  $a$  – себестоимость 1 рейса общественного транспорта.

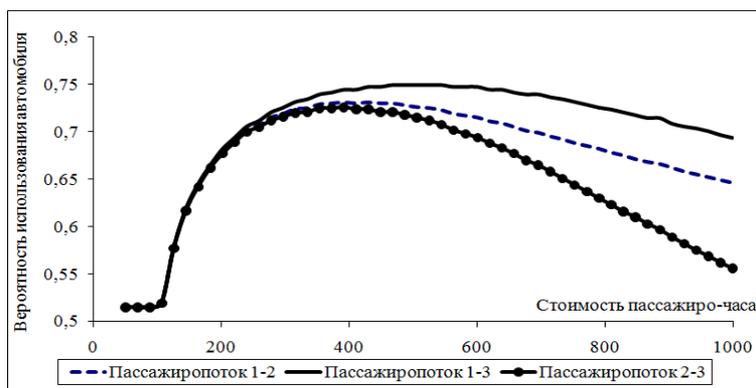
В этой модели общественный транспорт использует выделенные полосы для передвижения (например, трамвай). Поэтому заторы не влияют на время передвижения, что позволяет сократить субсидирование общественного транспорта [4] и, как следствие, нагрузку на бюджет.

Для данной математической модели существует решение (равновесие Нэша), так как представленные функции удовлетворяют условиям теоремы Нэша.

Значение параметров для данного численного примера: интенсивность пассажиропотока  $\lambda_{1,2} = \lambda_{1,3} = \lambda_{2,3} = 20000$ ; тариф на общественном транспорте  $c^t = 17$ ; время передвижения на общественном транспорте  $T_i^t = 0,667$ ; средняя стоимость пассажира-часа  $c^c = 200$ ;

ущерб от личного автотранспорта в час  $D = 50$ ; полезность зеленых насаждений на квадратный километр  $E = 3000000$ ; параметры логит функции  $a_0 = -2$ ,  $a_t = 0,08$ ,  $a_c = 0,2$ ; параметры BPR функции  $a_i = 0,3$ ,  $\beta_i = 3$ ; максимальная средняя скорость передвижения автомобиля  $v_0 = 40$ ; длина дороги  $L_i = 4$ ; площадь дороги на 1 автомобиль  $\delta = 0,0000017 \text{ км}^2$ .

### Численный пример



**Рисунок 2 – Влияние стоимости пассажиро-часа на выбор способа передвижения**

Одним из основных факторов, который меняется в развивающихся странах это стоимость времени (растет уровень жизни). Эта модель (рисунок 2) показывает, что в развивающихся странах увеличивается вероятность использования автомобиля, но на определенном уровне (уровень развитых стран) использование личных транспортных средств снижается.

### Заключение

Основным результатом исследования является построение математической модели, направленной на рациональное использование городской территории. Существование и единственность решения (равновесия Нэша) позволяет эффективно использовать модель на практике. Численный пример показывает что развивающиеся страны должны увеличивать зеленые зоны; уменьшить площадь асфальти-

рованных дорог, особенно в городском центре; увеличить частоту движения общественного транспорта.

### *Литература*

1. Вучик, В.Р. Транспорт в городах, удобных для жизни / В.Р. Вучик. – М.: Территория будущего, 2011.

2. Ховавко, И.Ю. Экономический анализ московских пробок / И.Ю. Ховавко // Государственное управление. Электронный вестник. – 2014. – № 43. – С. 121–134.

3. Balijepalli, N.C. Modelling the choice of car parks in urban areas and managing the demand for parking / N.C. Balijepalli, S.P. Shepherd, A.D. May // 87th Annual meeting of the Transportation Research board, 13th-17th Jan. 2008, Washington D.C.

4. Basso, L.J. Efficiency and substitutability of transit subsidies and other urban transport policies / L.J. Basso, H.E. Silva // American economic journal: economic policy. – 2014. – № 6(4). – pp. 1-33. DOI: <http://dx.doi.org/10.1257/pol.6.4.1>

5. Bertolini, L. Sustainable accessibility: a conceptual framework to integrate transport and land use plan making. Two test applications in the Netherlands and reflection on the way forward / L. Bertolini, F. le Clercq, L. Капоен // Transport policy. – 2005. – № 12 (3). – pp. 207–220. DOI: 10.1016/j.tranpol.2005.01.006.

6. Braess, D. Über ein Paradoxon aus der Verkehrsplanung, Unternehmensforschung. – 1969. – № 12 (1). – pp. 258–268. DOI: 10.1007/BF01918335

7. Bravo, M. An integrated behavioral model of the land-use and transport systems with network congestion and location externalities / M. Bravo, L. Briceño, R. Cominetti, C.E. Cortés, F.J. Martínez // Transportation Research Part B. – 2009. – № 44(4). – pp. 584–596. DOI:10.1016/j.trb.2009.08.002.

8. Te Brömmelstroet, M., Bertolini, L. Developing land use and transport PSS: meaningful information through a dialogue between modelers and planners / M. Te Brömmelstroet, L. Bertolini // Transport policy. – 2008. – № 15(4). – pp. 251–259. DOI: 10.1016/j.tranpol.2008.06.001.

9. Cervero, R. Linking urban transport and land use in developing countries / R. Cervero // Journal of transport and land use. – 2013. – № 6(1). – pp. 7–24. DOI: <http://dx.doi.org/10.5198/jtlu.v6i1.425>.

10. Ding, C. Paradoxes of traffic flow and economics of congestion pricing / C. Ding, S. Song, Y. Zhang // UNR Joint economics working paper series. Working paper. – No. 08-007. – 2008.

11. Dodgson, J.S. Quality competition in bus services / J.S. Dodgson, Y. Katsoulacos // Journal of transport economics and policy. – 1988. – № 22(3). – pp. 263–281.

12. Greenberg, H. An Analysis of Traffic Flow / H. Greenberg // Operations Research. – 1959. – № 7(1). – pp. 79–85. DOI: 10.1287/opre.7.1.79.

13. Greenshields, B.D. A study of traffic capacity / B.D. Greenshields // Highway research board proceedings. – 1935. – № 14. – pp. 448-477.

14. Hollander, Y. Determining the Desired Amount of Parking Using Game Theory / Y. Hollander, J. Prashker, D. Mahalel // Journal of Urban Planning and Development. – 2006. – № 132 (1). – pp. 53-61. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9488(2006)132:1(53).

15. Koryagin, M.E. An agent-based model for optimization of road width and public transport frequency / M.E. Koryagin // Promet – Traffic&Transportation. – 2015. – № 27(2). – pp. 147-153. DOI: 10.7307/ptt.v27i2.1559.

16. Koryagin, M.E. Optimization of the road capacity and the public transportation frequency which are based on logit-model of travel mode choice / M.E. Koryagin, A.I. Dekina // Communications in computer and information science. – 2014. – № 487. – pp. 214-222. DOI: 10.1007/978-3-319-13671-4\_26.

17. Liu, T.L. Continuum modeling of park-and-ride services in a linear monocentric city with deterministic mode choice / T.L. Liu, H.J. Huang, H. Yang, X. Zhang // Transportation research part B. – 2009. – № 43 (6). – pp. 692–707. DOI:10.1016/j.trb.2009.01.001.

18. Litman, T. Why and how to reduce the amount of land paved for roads and parking facilities / T. Litman // Environmental practice. – 2011. – № 13 (1). – pp. 38–46. DOI: 10.1017/S1466046610000530.

19. Mogridge, M. J. H. Travel in towns: jam yesterday, jam today and jam tomorrow? Macmillan Press. – London. 1990.

20. Takayama, Y. Scheduling preferences, parking competition, and bottleneck congestion: A model of trip timing and parking location choices by heterogeneous commuters / Y. Takayama, M. Kuwahara // MPRA Paper. University Library of Munich. Germany. – 2016. <http://EconPapers.repec.org/RePEc:pra:mprapa:68938>.

*Поступила 16 декабря 2016 года*