

РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНОЙ МАТРИЦЫ КОРРЕСПОНДЕНЦИИ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ г. БАРНАУЛА

А.В. Боровиков, Д.Ю. Каширский, С.А. Ульрих, В.И. Ведяшкин

Представлено исследование по делению города Барнаула на транспортные районы, разработана матрица корреспонденции, представлена методика расчета матрицы корреспонденции, а также распределение транспортной загрузки города Барнаула.

Ключевые слова: транспортная сеть, матрица корреспонденции, гравитационная модель, транспортные районы.

Основным недостатком современных городов в РФ является сосредоточение деловой активности в историческом центре города, что в свою очередь создает предпосылки для зарождения и поглощения значительных транспортных потоков (ТП) в этом районе. Эти ТП и ТП идущие транзитом оказывают значительное влияние на загрузку улично-дорожной сети (УДС) центра и прилегающую непосредственно к центральной деловой части города (ЦДЧГ), используемую для транзита. В совокупности с искусственным (ж/д) или естественным (река) разделением территории города на несколько частей, создаются условия, при которых участки УДС используемые для «внутреннего транзита» постоянно перегружены. Для исключения влияния транзитного потока на загрузку УДС предлагается создание системы связей с помощью эстакад, в обход «узких мест» существующей УДС. При этом необходимо определить потребную пропускную способность этих связей, то есть ширину проезжей части и количество полос [1].

Поскольку основное внимание обращено на «внутренний транзит», то видится целесообразным проводить укрупненное транспортное районирование, выделяя не отдельные транспортные районы, а объединяя их в мегарайоны по принципу разделения «узкими местами» на УДС.

Спрос на передвижения в городе описывается набором матриц корреспонденции. Результатом прогноза являются матрицы суточных корреспонденций легкового и грузового транспорта.

Суточные матрицы корреспонденции легкового транспорта прогнозируют отдельно для следующих видов передвижений: трудовые внутригородские; деловые внутригородские; транзитные; рекреационные (поездки в садовые и дачные поселки, зоны отдыха); на связях города с другими населенными пунктами.

Суточные матрицы корреспонденций грузового транспорта прогнозируют отдельно для транспорта малой грузоподъемности, средней и высокой грузоподъемности по следующим видам передвижений: внутригородские; на связях города с другими населенными пунктами; транзитные относительно города.

Прогнозирование интенсивности городского движения состоит из двух последовательных этапов, первый этап представляет собой прогнозирование спроса на передвижения, второй этап заключается в прогнозировании распределения спроса на передвижения по улично-дорожной сети города.

Для построения матрицы корреспонденций необходимо разбить город на транспортные районы, число которых задается исходя из численности населения в нем и уровня автомобилизации.

Существуют разные методики для вычисления элементов матрицы, в том числе с применением математических моделей. Рассмотрим наиболее часто используемые: гравитационную и энтропийную модели построения матрицы корреспонденций.

Гравитационная модель исходит из аналогии с законом всемирного тяготения, гласящего, что сила взаимодействия между двумя телами прямо пропорциональна массам этих тел и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Таким образом, гравитационная модель имеет вид [2]:

$$T_{ij} = k \frac{Q_i \cdot D_j}{c_{ij}^2}, \quad i = 1, \dots, N, \quad j = 1, \dots, M, \quad (1)$$

где T_{ij} - число корреспонденций между районами i и j ,

Q_i - объем отправок из района i ,

D_j - объем прибытий в район j ,

c_{ij} - затраты на передвижение между зонами i и j ,

N - общее количество зон отправления,

M - общее количество зон прибытия,

k – калибровочный коэффициент.

Однако, при увеличении значений Q_i и D_j , к примеру, в два раза, величина корреспонденций в соответствии с уравнением (1) увеличится в четыре раза, но на самом деле оно только удвоится. Для устранения этого недостатка были введены ограничения:

$$\sum_i^N T_{ij} = D_j, \quad i = 1, \dots, N, \quad (2)$$

$$\sum_j^M T_{ij} = Q_i, \quad j = 1, \dots, M, \quad (3)$$

$$T_{ij} \geq 0, \quad i = 1, \dots, N, \quad j = 1, \dots, M. \quad (4)$$

Уравнение (2) означает, что суммарный поток, выехавший из всех районов $i = 1, \dots, N$ в район j должен совпадать с потоком, прибывшим в район j . Аналогично уравнение (3) означает, что суммарный поток, выехавший обратно из всех районов $j = 1, \dots, M$ в район i должен равняться числу прибывших в район i . Иными словами суммарные объемы по выезду и въезду должны быть равными, то есть $\sum_i^N Q_i = \sum_j^M D_j$. При этом потоки не могут быть отрицательными.

Иная форма записи модифицированной гравитационной модели имеет вид:

$$T_{ij} = A_i B_j Q_i D_j f(c_{ij}), \quad i = 1, \dots, N, \quad j = 1, \dots, M, \quad (5)$$

где

$$A_i = \left[\sum_j^M B_j D_j f(c_{ij}) \right]^{(-1)}, \quad i = 1, \dots, N, \quad (6)$$

$$B_j = \left[\sum_i^N A_i Q_i f(c_{ij}) \right]^{(-1)}, \quad j = 1, \dots, M, \quad (7)$$

$$f(c_{ij}) = \exp(-\beta c_{ij}). \quad (8)$$

Здесь коэффициенты A_i и B_j можно определить из условий (2) и (3) соответственно, а квадрат затрат c_{ij} заменен на некоторую функцию тяготения $f(c_{ij})$, причем, при расчете трудовых корреспонденций, полагают $\beta \approx 0.065$ [3].

В настоящее время для расчета корреспонденций более широкое распространение получили энтропийные модели, а гравитационные модели могут быть использованы лишь для задач, имеющих ярко выраженную дискретную структуру потребительского поля.

Энтропийная модель была получена из аналогии со вторым законом термодинамики,

гласящим, что любая замкнутая физическая система стремится достичь устойчивого равновесного состояния, которое характеризовалось бы максимумом энтропии.

В физической системе можно выделить макроуровень и микроуровень. Макроуровень можно охарактеризовать энергией, температурой и другими параметрами. Огромное число частиц микроуровня, случайным образом взаимодействующих между собой, определяет значение этих параметров.

При рассмотрении городского движения макроуровень характеризуется суммарными транспортными расходами, капитальными вложениями и т.д., а микроуровень представляет собой передвигающихся по городу индивидуумов. Следовательно, определение корреспонденций T_{ij} сводится к задаче максимизации энтропии системы.

Примером первых энтропийных моделей может служить модель [4]:

$$\min_{T_{ij}} \left(\sum_i^N \sum_j^M T_{ij} c_{ij} + \beta \sum_i^N \sum_j^M \ln T_{ij} \right), \quad (9)$$

$$\sum_j^M T_{ij} = Q_i, \quad \sum_i^N T_{ij} = D_j, \quad T_{ij} \geq 0. \quad (10)$$

Здесь за β обозначена средневзвешенная стоимость проезда. Под c_{ij} понимается стоимость проезда единицы потока из сегмента i в сегмент j .

Выражение (9) можно привести к виду:

$$\max_{T_{ij}} \sum_i^N \sum_j^M T_{ij} \ln \frac{T_{ij}^0}{T_{ij}}, \quad (11)$$

$$T_{ij}^0 = \exp \frac{-c_{ij}}{\beta}, \quad (12)$$

где T_{ij}^0 - распределение корреспонденции, при отсутствии ограничений.

Другим примером энтропийной модели может служить модель [5]:

$$\max_{T_{ij}} \sum_i^N \sum_j^M T_{ij} \ln \frac{\alpha_{ij}}{T_{ij}} \quad (13)$$

при тех же ограничениях (10).

Величины α_{ij} представляют собой априорные предпочтения участников движения и определяются по формуле:

$$\alpha_{ij} = \exp(-\beta c_{ij}). \quad (14)$$

Коэффициент β зависит от средних затрат времени на реализацию передвижений. При сокращении этих затрат и, соответственно, дальности поездок значение коэффициента увеличивается, при их увеличении -

уменьшается. Если затраты времени не оказывают влияние на поведение передвигающихся индивидуумов, то коэффициент имеет нулевое значение. Такая ситуация характерна для небольших городов, а также при дефиците рабочих мест.

Объемы отправок (Q_i) из района i и прибытий (D_j) в район j трудовых корреспонденций, реализуемых на легковом автотранспорте, можно определить из формул [6]:

$$Q_i = M \cdot a \cdot k_T(a) \cdot Z_i / \sum Z_i, \quad (15)$$

$$D_j = M \cdot a \cdot k_T(a) \cdot R_j / \sum R_j, \quad (16)$$

где M - численность населения города, тыс. жит.,

a - уровень автомобилизации индивидуальными легковыми автомобилями, авт./тыс.жит.,

Z_i - численность занятого населения в районе i , тыс. жит.,

R_j - число мест приложения труда в районе j , мест,

$k_T(a)$ - коэффициент пропорциональности для трудовых корреспонденций, определяемый по графику, представленному на рисунке 1.

Для прогнозирования трудовых передвижений на легковом транспорте была выбрана энтропийная модель (13). Ниже приведен алгоритм расчета с помощью данной модели [6].

Шаг 1. Задание начальных значений вспомогательных переменных:

$$q_i = 1, \quad d_j = 1,$$

$$i = 1, 2 \dots N, j = 1, \dots M$$

и значение точности расчета ε .

Шаг 2. Определение текущих значений корреспонденций:

$$T_{ij} = q_i \cdot d_j \cdot \exp(-\beta \cdot c_{ij}), \quad (17)$$

$$i = 1, 2 \dots N, j = 1, \dots M.$$

Шаг 3. Корректировка значений вспомогательных переменных q_i^* :

$$q_i^* = \frac{Q_i}{\sum_{j=1}^M d_j \exp(-\beta \cdot c_{ij})}, \quad (18)$$

$$i = 1, \dots N.$$

Шаг 4. Корректировка значений вспомогательных переменных d_j^* :

$$d_j^* = \frac{D_j}{\sum_{i=1}^N q_i \exp(-\beta \cdot c_{ij})}, \quad (19)$$

$$j = 1, \dots M.$$

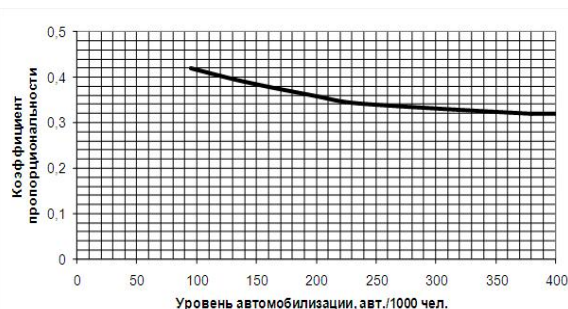


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента пропорциональности от уровня автомобилизации для расчета трудовых корреспонденций

Шаг 5. Корректировка значений корреспонденций:

$$T_{ij}^* = q_i^* \cdot d_j^* \cdot \exp(-\beta \cdot c_{ij}), \quad (20)$$

$$i = 1, 2 \dots N, j = 1, \dots M.$$

Шаг 6. Проверка условия завершения расчета. Расчет заканчивается, если разница между текущими и откорректированными значениями корреспонденций не превышает заданной величины, то есть если для любой пары районов i и j выполнено неравенство

$$|T_{ij} - T_{ij}^*| \leq \varepsilon.$$

В противном случае для продолжения вычислений текущие значения всех корреспонденций T_{ij} и вспомогательных переменных q_i, d_j заменяют откорректированными T_{ij}^*, q_i^*, d_j^* и выполняют возвращение к шагу 3.

Для примера был выбран Барнаул – как типичный российский город на берегу реки и с железной дорогой, делящей город на две части.

Предполагается, что транспортные мегарайоны будут соединены между собой специальными магистралями, не имеющими связи с УДС мегарайона, территория которого используется для транзита. Схема транспортной сети с предлагаемыми условными связями показана на рисунке 2.

Вся территория города исторически разделена на 6 мегарайонов:

- 1) Центр;
- 2) Мастерские;
- 3) Южный;
- 4) Поток;
- 5) Докучаево;
- 6) Новосиликатный.

Для расчета предполагаемых значений интенсивностей потоков, на магистралях, соединяющих мегарайоны, используем полученную ранее матрицу транспортных коррес-

пондений между транспортными районами. После введения мегарайонов и перерасчета матрицы транспортной корреспонденции, получили следующие значения приведенные в таблице 1.

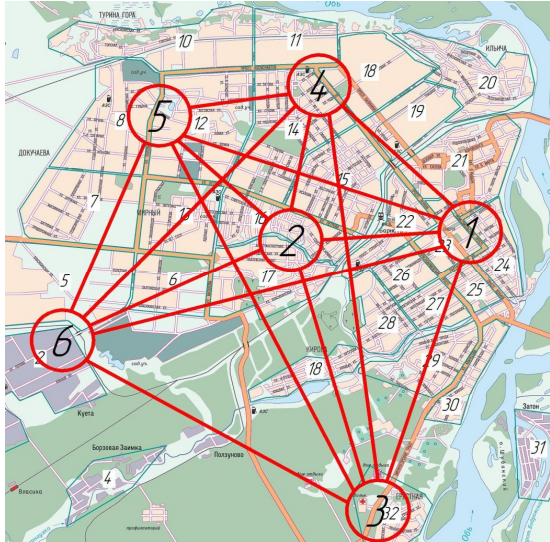


Рисунок 2 – Мегарайоны с условными связями

Таблица 1 – Матрица транспортной корреспонденции легкового автотранспорта в будний день с 7:00 до 9:00

| №ТР | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----|------|------|------|------|------|------|
| 1 | - | 1898 | 1818 | 4684 | 2672 | 3747 |
| 2 | 3648 | - | 1287 | 3315 | 1891 | 2652 |
| 3 | 1574 | 576 | - | 1421 | 811 | 1137 |
| 4 | 3517 | 1295 | 1241 | - | 1898 | 2557 |
| 5 | 3405 | 1143 | 1201 | 3095 | - | 2476 |
| 6 | 1094 | 403 | 386 | 950 | 567 | - |

Потребную пропускную способность магистрали, P , авт/ч, рассчитаем исходя из интенсивности потока и допустимого уровня загрузки дороги движением.

$$N \leq P_n, \quad (21)$$

где N – интенсивность движения в приведенных единицах, авт/ч.; P_n – пропускная способность участка автодороги с числом полос n , авт/ч.

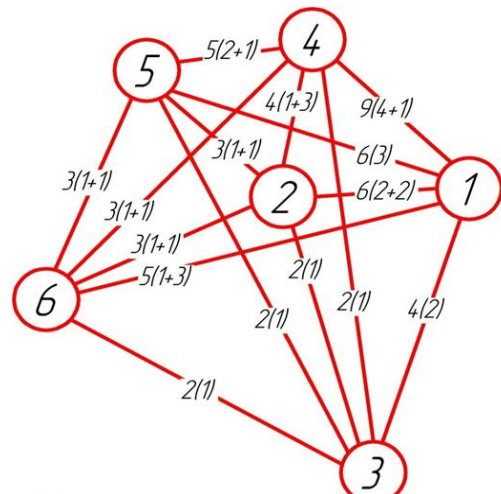
Примем для городских дорог пропускную способность одной полосы $P_1=1260$ авт/ч, двух полос $P_2=2394$ авт/ч, трех полос $P_3=3402$ авт/ч, четырех полос $P_4=4410$ авт/ч.

Таким образом, проведя расчет, получим информацию о потребной пропускной способности магистрали и количестве полос движения для удовлетворения спроса на передвижение между мегарайонами. В расчетах количества полос принимается предположение, что трудовые корреспонденции происходят по одному и тому же маршруту. Результаты расчета представлены в таблице 2 и рисунке 3.

Таблица 2 – Потребное количество полос движения

| Направление | Интенсивность в «часы пик» | Потребное количество полос в одном направлении | Направление | Интенсивность в «часы пик» | Потребное количество полос |
|-------------|----------------------------|--|-------------|----------------------------|----------------------------|
| 1-2 | 1898 | 2 | 2-1 | 3648 | 4 |
| 1-3 | 1818 | 2 | 2-3 | 1287 | 1 |
| 1-4 | 4684 | 5 | 2-4 | 3315 | 3 |
| 1-5 | 2672 | 3 | 2-5 | 1891 | 2 |
| 1-6 | 3747 | 4 | 2-6 | 2652 | 2 |
| 3-1 | 1574 | 2 | 4-1 | 3517 | 4 |
| 3-2 | 576 | 1 | 4-2 | 1295 | 1 |
| 3-4 | 1421 | 1 | 4-3 | 1241 | 1 |
| 3-5 | 811 | 1 | 4-5 | 1898 | 2 |
| 3-6 | 1137 | 1 | 4-6 | 2557 | 2 |
| 5-1 | 3405 | 3 | 6-1 | 1094 | 1 |
| 5-2 | 1143 | 1 | 6-2 | 403 | 1 |
| 5-3 | 1201 | 1 | 6-3 | 386 | 1 |
| 5-4 | 3095 | 3 | 6-4 | 950 | 1 |
| 5-6 | 2476 | 2 | 6-5 | 567 | 1 |

Предложенный способ расчета пропускной способности магистралей позволяет определить потребную пропускную способность и количество полос для движения между транспортными мегарайонами, позволяя исключить транзитную составляющую транспортного потока. Так же, полученные данные могут быть использованы для определения направлений развития сквозных магистралей города.



$a(b+c)$; a – общее число полос; b – число полос в каждом направлении; c – число реверсивных полос;

○ – мегарайон;

— проектируемая условная связь

Рисунок 3 – Потребное количество полос для связи мегарайонов

РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНОЙ МАТРИЦЫ КОРРЕСПОНДЕНЦИИ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ г. БАРНАУЛА

Спрогнозированная матрица трудовой корреспонденции на легковом транспорте наложенная на граф УДС г.Барнаула позволила выявить "узкие" места на УДС города (рисунок 4).

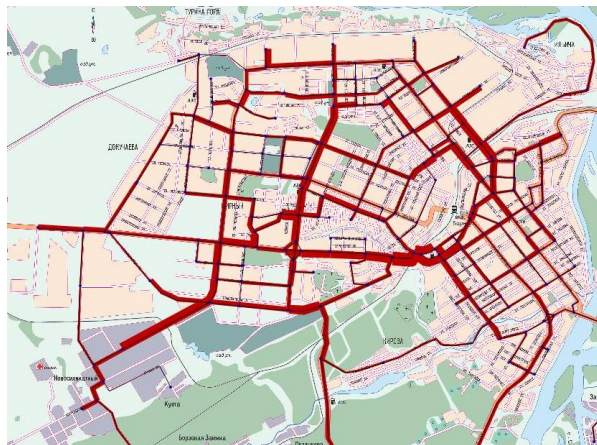


Рисунок 4 – Загрузка транспортной сети г. Барнаула

Так было установлено, что наиболее сложная транспортная ситуация наблюдается на пересечении Павловского тракта с проспектом Строителей, а также на проспекте Ленина в районе моста, рядом с Юбилейным рынком.

Это можно объяснить тем, что железная дорога, проходящая через город, делит его на две части, основное транспортное сообщение между которыми осуществляется через указанные участки УДС.

Следует отметить, что моделирование реальной транспортной ситуации с помощью математических моделей позволяет оценить эффективность долгосрочных инвестиций в решении транспортных проблем, в том числе, возможно, просчитать эффективность транспортной сети в генеральном плане г. Барнаула.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боровиков А.В., Каширский Д.Ю. Определение направлений развития сквозных магистралей на примере г. Барнаула // Материалы I Всероссийской научно-практической конференции 25–26 апреля 2013 года / под ред. д. т. н., профессора В.И. Беляева. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2013. — С. 131—133
2. Введение в математическое моделирование транспортных потоков: учеб. пособие / Гасников А.В., Кленов С.Л., Нурминский Е.А., Холодов Я.А., Шамрай Н.Б. Под ред. А.В. Гасникова. — М.: МФТИ, 2010. — 362 с.
3. Алиев А.С. Моделирование транспортных потоков в крупном городе с применением к Московской агломерации: / А.С. Алиев, А.И. Стрельников, В.И. Швецов, Ю.З. Шершевский // Автоматика и телемеханика.- 2005.- №11.- С. 113-125.
4. Васильева Е.В. Нелинейные транспортные задачи на сетях: / Е.В. Васильева, Б.Ю. Левит, В.Н. Лившиц. – М: Финансы и статистика, 1981.
5. Васильева Е.В. Оптимизация планирования и управления транспортными системами: / Е.В. Васильева, Р.В. Игудин, В.Н. Лившиц. – М: Транспорт, 1987.
6. Руководство по прогнозированию интенсивности движения на автомобильных дорогах: ОДМ. – Утвержд. 2003-06-19. – М.: Росавтодор, 2003. – 87 с.

Боровиков А.В., аспирант
Каширский Д.Ю., к.т.н., доцент

Ульрих С.А., к.т.н., доцент

Ведяшкин В.И., аспирант

ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова»,
кафедра «Организация и безопасность движения»,
e-mail: kafedra-obd@mail.ru;
тел. (83852) 290813