

УДК 656.02

Лебедева Ольга Анатольевна,
к.т.н., доцент кафедры «Управление на автомобильном транспорте»,
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
тел.: +7(952)6326611, e-mail: kravhome@mail.ru

Кулакова Ирина Михайловна,
к.т.н., доцент кафедры «Вычислительные машины и комплексы»,
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
тел.: +7(908)651357, e-mail: iyelkina@mail.ru

ОЦЕНКА ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ УЧАСТКА УЛИЧНО-ДОРОЖНОЙ СЕТИ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ МОДЕЛИ МАКСИМИЗАЦИИ ЭНТРОПИИ

Lebedeva O.A., Kulakova I.M.

ASSESSMENT OF THE CAPACITY OF A SITE OF THE ROAD NETWORK BY APPLYING THE ENTROPY MAXIMIZATION MODEL

Аннотация. В статье приведен анализ пропускной способности участка улично-дорожной сети с применением модели максимизации энтропии. Целью настоящего исследования является оценка матрицы корреспонденции с применением модели энтропии на примере конкретного участка улично-дорожной сети (ул. Московская и ул. Глинки г. Ангарска). Исходные данные модели обработаны в соответствии с кодировкой направлений движений на пересечении, которая применяется для упрощения ввода полевых замеров интенсивности транспортного потока. В рамках исследований матрица корреспонденций используется при разработке и изменениях локальной схемы управления интенсивностью движения, введении запретов и для оперативного реагирования на перераспределение потока в рамках городского пространства.

Ключевые слова: модель энтропии, транспорт, матрица корреспонденций, интенсивность, пропускная способность, улично-дорожная сеть.

Abstract. The article assesses the capacity of a section of the road network using an entropy maximization model. The purpose of this study is to evaluate the correspondence matrix using the entropy model using the example of a specific section of the road network (Moskovskaya St. and Glinka St., Angarsk). The initial data of the model is processed in accordance with the encoding of the directions of movement at the intersection, which is used to simplify the input of field measurements of traffic flow intensity. As part of the research, the correspondence matrix is used in the development and changes of the local traffic intensity control scheme, the introduction of bans and for prompt response to the redistribution of traffic flow in within the urban space.

Keywords: entropy model, transport, correspondence matrix, intensity, throughput, road network.

Понятие энтропии постепенно охватывает все больше областей, исключением не стала и отрасль транспортной логистики. Независимо от использования, энтропия связана с функциональной формой $x \log x$. В зависимости от теоретических рамок функциональная форма модифицируется с соответствующими интерпретациями. Рассмотрим максимизацию энтропии в качестве методологии построения моделей, а также использования общепринятой гравитационной модели для иллюстрации ее применения к транспортным задачам.

В соответствии с транспортной стратегией Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года в режи-

ме перегрузки работает порядка 21 процента федеральных автомобильных дорог. К закономерностям, отмеченным в этом процессе, можно отнести снижение пропускной способности улично-дорожной сети городов, а как следствие снижение качества жизни населения [1].

Анализ транспортных задач и разработка мероприятий по их решению часто требуют оценки количества поездок между различными точками исследуемой территории. Эта структура поездок обычно сводится к форме матрицы корреспонденций пункт отправления-назначения (матрица OD), представляющей собой меру спроса на поездки в рассматриваемом районе.

Традиционные методы оценки матриц поездок довольно дороги и требуют значительных ресурсов: рабочей силы, времени, сложности организации процесса мониторинга и обработки данных. Надежность этих методов достаточно низка и оцененные таким образом матрицы корреспонденций не всегда применимы к обследованиям на реальной транспортной сети [2].

Актуальность оценки транспортного спроса путем разработки методики восстановления матрицы корреспонденций не вызывает сомнения в связи с необходимостью обновления локальных схем управления транспортным потоком. Схема управления транспортным потоком включает такие меры, как: введение односторонних схем движения; запрет поворотов; запрет движения определенных классов транспортных средств на некоторых участках улично-дорожной сети.

Простого наблюдения об увеличении средней скорости недостаточно для изменения схемы управления дорожным движением [3]. Более высокие скорости могут быть достигнуты за счет длины маршрута, что приведет к увеличению таких показателей, как время в пути и расходы в системе в целом. Единственный практический способ оценить эти изменения – проследить их влияние с помощью матрицы корреспонденций [4]. Это касается независимо от того, используется ли модель для разработки схемы управления дорожным движением или просто для оценки конкретной схемы.

Цель исследования – разработка модели оценки интенсивности на участке сети (перекрестке) с учетом направлений движения.

Количество поездок из пункта отправления i в пункт назначения j представлено T_{ij} , а полный набор поездок, охватывающий все центроиды области, составляет поездку $[T_{ij}]$. Таким образом, матрица – это представление объемов поездок, перемещающихся между парами зон. Это зависит от двух форм агрегации: пространственной и временной. Пространственная агрегация предполагает группировку территорий в отдельные единицы или зоны. При крупномасштабном моделировании количество зон может исчисляться тысячами, тогда как для мелкомасштабных схем управления дорожным движением от 25 до 50 зон достаточно. Но даже в последнем случае количество яче-

ек довольно велико (2500 для случая 50×50), и большинство из них, скорее всего, будут содержать нули или небольшие числа. Таким образом, матрицы являются довольно разреженными.

Временная агрегация связана с интервалом времени, в течение которого учитываются поездки между зонами. Выбор этого временного интервала оказывает большое влияние на матрицу OD и ее полезность при анализе конкретных проблем. Детальный анализ транспортной системы требует временные интервалы порядка 15 минут, чтобы можно было отслеживать увеличение и уменьшение длины очереди и времени в пути. С другой стороны, большинство задач управления дорожным движением требуют учета только на уровне почасового потока и многие проблемы, связанные со строительством новых дорог, могут быть решены с помощью матриц OD, основанных на 16 или 24 часах. Действительно, в некоторых исследованиях используется недельный, месячный или годовой спрос. Еще одна задача – разреженность. Чем меньше интервал времени, тем больше будет количество ячеек, содержащих нулевые поездки в матрице поездок. Разреженность также связана с высоким уровнем ошибок в матрице. На практике учитываются практически любые матрицы корреспонденций при условии, что они не имеют очевидных несоответствий.

Для нахождения матрицы корреспонденций рассмотрим базовую модель. L.G. Willumsen [5] разработал модель максимизации энтропии для оценки матрицы корреспонденций на основе интенсивности движения. Выбираются равновероятные микросостояния и мезосостояния $[T_{ij}]$. Но в этом случае ограничения на окончание поездки и общие затраты заменяются набором линейных ограничений, представляющих подсчитанные потоки. Они отражают информацию о макросостоянии системы. Тогда представленная проблема заключается в следующем:

$$\text{Max} S_1 = - \sum_{ij} T_{ij} (\log T_{ij} - 1), \quad (1)$$

при условии:

$$\sum_{ij} T_{ij} p_{ij}^{lm} - v_{lm} = 0 \quad (2)$$

для некоторых lm (подсчитанных потоков) и $T_{ij} \geq 0$.

Формальное решение получается путем формирования Лагранжиана:

$$\alpha = \sum_{ij} T_{ij} (\log T_{ij} - 1) + \sum_{lm} \lambda_{lm} (v_{lm} - T_{ij} p_{ij}^{lm}), \quad (3)$$

и дифференцируя его по T_{ij} получим:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial T_{ij}} = -\log T_{ij} - \sum_{lm} \lambda_{lm} p_{ij}^{lm} = 0 \quad (4)$$

Таким образом:

$$T_{ij} = e^{-\sum_{lm} \lambda_{lm} p_{ij}^{lm}} = 0 \quad (5)$$

Введем замену переменной:

$$e^{-\lambda_{lm}} = X_{lm} \quad (6)$$

$$T_{ij} = \pi_{lm} \times X_{lm}^{p_{ij}^{lm}} \quad (7)$$

Уравнения (2) и (7) принадлежат к классу моделей, названных Murchland J.D. многопропорциональными задачами [6]. Эти задачи можно решать итеративно, взяв каждое уравнение потока (2) одновременно и изменив матрицу так, чтобы смоделированные потоки воспроизводили наблюдаемые до тех пор, пока не будет выполнен некоторый критерий сходимости. Новые переменные X_{lm} играют аналогичную роль балансирующих факторов A_i и B_j .

В гравитационной модели каждая пара появляется только в одной строке и сумме столбцов. Затем каждая пара корреспонденций будет пропорционально скорректирована один раз [7, 8].

Рассмотрим модель с предварительной информацией. Эту модель можно адаптировать для использования априорной информации о матрице поездок в соответствии с принципами, предложенными Batty M. и March L. [9], Nathanson M [10]. Только целевая функция (1) меняется при использовании меры S_4 вместо S_1 . Тогда задача формулируется следующим образом:

$$\text{Max} S_4 = -\sum_i T_{ij} (\log \frac{T_{ij}}{t_{ij}} - 1) \quad (8)$$

при тех же ограничениях (2).

Формальное решение получается путем формирования Лагранжиана и дифференцирования его по $[T_{ij}]$. Эквивалентная замена переменной (6) приводит к новому виду:

$$T_{ij} = t_{ij} \pi_{lm} X_{lm}^{p_{ij}^{lm}}, \quad (9)$$

что является вариантом многопропорциональной задачи.

Когда предварительная информация недоступна, разумным предположением является сделать все t_{ij} равными, и в этом случае модель (9) возвращается к (8).

В этом контексте априорная матрица $[t_{ij}]$ может быть получена из предыдущей

матрицы небольшого выборочного обследования или путем выделения из более крупного транспортного исследования. В таких случаях энтропия играет роль меры «расстояния» между $[t_{ij}]$ и $[T_{ij}]$. Таким образом, модель (9) возможно интерпретировать как матрицу корреспонденций, соответствующую наблюдаемым подсчетам и наиболее близкую к предыдущей матрице. Поскольку модели в (6) и (9) были разработаны на основе максимизации энтропии, было принято решение называть их моделями оценки матрицы максимальной энтропии с предварительной информацией и без нее.

В обеих моделях переменная X_{lm} может иметь одинаковую интерпретацию из-за ее связи с множителем Лагранжа λ_{lm} . В модели без предварительной информации (9) переменная X_{lm} может быть связана с наблюдаемым подсчетом на звене X_{lm} в формировании матрицы поездок. В модели с априорной информацией X_{lm} модификация матрицы зависит от наблюдения объема. В обоих случаях объем наблюдений взвешивается показателем r_{ij}^{lm} , представляющим долю каждой пары корреспонденций, которая использует этот путь.

Восстановление матрицы корреспонденций произведем на примере конкретного участка улично-дорожной сети (перекрестка) с «пиковым» временным интервалом. Рассмотрим методику сбора данных. Она сводится к следующему: пропускная способность определяется с использованием натурных обследований. Учетчики фиксируют интенсивность движения посредством видеокамеры на перекрестке города, а затем проводится обработка полученных файлов с учетом потоков по всем направлениям движения. Оценка матрицы строится на восстановлении интенсивности движения между звеньями транспортной сети. Матрица корреспонденций, является мерой спроса на передвижения на конкретном участке. Такие обследования очень трудоемки и требуют тщательной обработки, поэтому их масштаб зависит от целей исследования.

На рисунке 1 рассмотрим схему пересечения ул. Глинки и ул. Московская в г. Ангарске.

Обследования проводились на нерегулируемом пересечении в одном уровне. Главным направлением является ул. Московская, а второстепенным – ул. Глинки.

Сложность обследования зависит от: пропускной способности участка; количества полос движения; ширины улично-дорожной сети; движения пешеходов.

Замеры интенсивности движения по направлениям (на перекрестке выделено 14) представлены в таблице 1. Обследование охватывает грузовые, легковые и специальные транспортные средства (ТС) и автобусы.

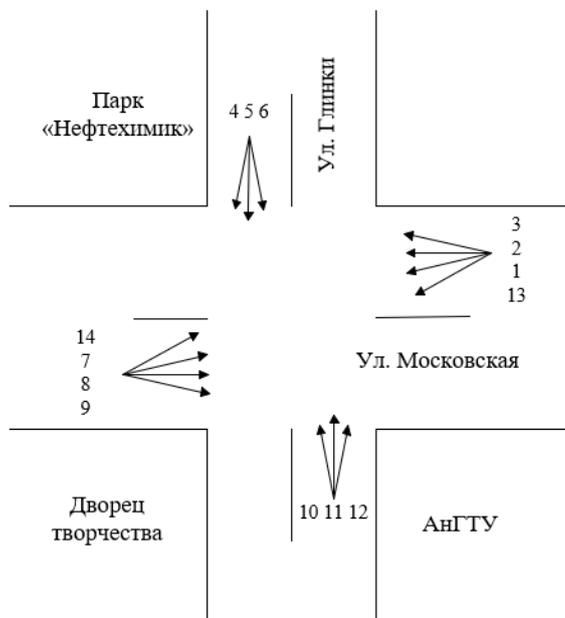


Рис. 1. Схема пересечения ул. Глинки – ул. Московская

Таблица 1
Замеры интенсивности движения по направлениям в час «пик», авт./час

Направление движение ТС	Вид ТС				Сумма в приведенных автомобилях
	легковые ТС	грузовые ТС	специальные ТС	автобусы	
1	45	0	0	0	45
2	138	21	3	0	186
3	33	3	0	0	39
4	9	0	0	0	9
5	105	3	0	0	111
6	36	3	0	0	42
7	12	0	0	0	12
8	81	3	0	0	87
9	9	0	0	0	9
10	18	3	0	0	24
11	177	3	3	0	189
12	39	0	0	0	39
13	6	0	0	0	6
14	3	0	0	0	3
Итого	711	39	6	0	801

На обследуемом участке интенсивность движения в рабочий день, в «час пик» с 17.00 до 18.00 составила 756 автомобилей в час (в приведенных автомобилях 801 авто-

мобилям в час). Суммарная интенсивность складывается из легковых транспортных средств – 94 %, и грузовых – 6 %. Данный перекресток относительно аналогичных в

городе, имеет не самую высокую интенсивность движения.

Результаты эксперимента для перехода к данным модели должны быть предварительно обработаны в соответствии со следующим принципом кодировки потоков относительно траектории движения по перекрестку: (2) – код улицы, по которой автомобиль заехал на перекресток; 1 – ул. Московская; 2 – ул. Глинки; (3) – код дороги, по ко-

торой автомобиль выехал с перекрестка: 1 – ул. Московская; 2 – ул. Глинки; (4) – направление движения на перекрестке: 0 – поворот налево или разворот; 1 – поворот направо или движение прямо; (5) – направление, с которого автомобиль подъехал к перекрестку. Схема перекрёстка с кодировками направлений движений на пересечении приведена в таблице 2.

Таблица 2

Обозначение кодировки направлений движений на пересечении

Измеренный поток по направлению (рисунок 1)	Код улицы въезда на перекресток	Код улицы выезда с перекрестка	Направление траектории движения по перекрестку	Направление траектории движения к перекрестку	Сумма в приведенных автомобилях
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	1	2	0	0	45
2	1	1	1	0	186
3	1	2	1	0	39
4	2	1	1	0	9
5	2	2	1	0	111
6	2	1	0	0	42
7	1	2	0	1	12
8	1	1	1	1	87
9	1	2	1	1	9
10	2	1	0	1	24
11	2	2	1	1	189
12	2	1	1	1	39
13	1	1	0	0	6
14	1	1	0	1	3

Используя таблицу 2, можно рассчитать величины потоков по звеньям транспортной сети 1-5, 2-5, 3-6, 4-6, 5-6 (рисунок 2).

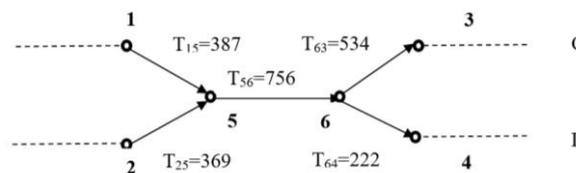


Рис. 2. Транспортная сеть перекрестка с потоками

T_{15} – представляет весь транспортный поток, который заезжает по улице 1 и находится, как сумма по столбцу (6) для строк, где столбец (2) =1;

T_{25} – представляет весь транспортный поток, который заезжает по улице 2 и находится, как сумма по столбцу (6) для

строк, где столбец (2) =2;

$$T_{56} = T_{15} + T_{25} \quad (10)$$

T_{63} – представляет весь транспортный поток, который выезжает по улице 1 и находится, как сумма по столбцу (6) для строк, где столбец (3) =1;

T_{64} – представляет весь транспортный

поток, который выезжает по улице 2 и находится, как сумма по столбцу (6) для строк, где столбец (3) = 2.

Столбцы (4) и (5) в рамках транспортной сети являются избыточными и вводятся для однозначной идентификации экспериментальных данных.

Переопределенные таким образом, замеры могут использоваться в качестве исходных данных модели транспортной сети.

В таблице 3 представлены результаты восстановления матрицы корреспонденций путем применения модели энтропии на пересечении ул. Глинки – ул. Московская

Таблица 3

Матрица корреспонденций на пересечении ул. Глинки – ул. Московская

пункт отправления (O)	пункт назначения (D)	
	3	4
1	279	108
2	255	144

Как видим из оценки матрицы корреспонденций, интенсивность движения на перекрестке сравнительно невелика. Но ул. Глинки является дублером более загруженных ул. Ленина и ул. Горького.

Цель данного исследования выполнена, разработанная кодировка упростила процедуру внесения данных в модель, а методика позволила восстановить матрицу корреспонденций.

По результатам проведенных исследований можно отметить следующее:

1. В основу модели восстановления матрицы корреспонденций положена базовая модель предварительной информации, которая расширена для использования априорной информации о матрице поездок. Априорная матрица может быть получена из предыдущей путем небольшого выборочного обследования или посредством выделения матрицы из более крупного транспортного

исследования.

2. Полевой эксперимент проводится на основе учета количества проходящих транспортных единиц в сечении улиц и перекрестка. Для моделирования работы сети необходимо знать величину транспортных потоков и их распределение по направлениям движения. Кодировка направлений применяется для упрощения ввода данных полевых замеров.

3. В результате исследования была восстановлена матрица корреспонденций на пересечении ул. Глинки – ул. Московская в г. Ангарске при интенсивности 756 автомобилей в час пик. Предложенная методика оценки корреспонденций при апробации модели на нескольких участках одновременно позволит разработать проекты городской планировки, генеральный план города и комплексную транспортную схему.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Транспортная стратегия РФ на период до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года [Электронный ресурс]: утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р. Официальный сайт Росавтодор. URL: <https://rosavtodor.gov.ru/docs/transportnaya-strategiya-rf-na-period-do-2030-goda-s-prognozom-na-period-do-2035-goda/> (дата обращения: 14.10.2023).

2. **Лебедева, О. А.** Подход к оценке матриц на основе внутризональных поездок / О. А. Лебедева, И. М. Кулакова // Современные технологии и научно-технический прогресс. 2023. № 10. С. 184-185.

3. **Пиров, Ж. Т.** Влияние распределения транспортных потоков на скорость сообщения на сегментах городских улиц с регулируемым движением / Ж. Т. Пиров, А. Ю. Михайлов // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2020. № 2. С. 115-124.

4. **Wardrop, J. G.** Some theoretical aspects of road traffic research / J. G. Wardrop // Proceedings Institute of Civil Engineers, Part II, 1, 1952, 325-378.

5. **Willumsen, L. G.** Estimation of an O-D matrix from traffic counts: a review / L. G. Willumsen // Institute for Transport Studies Working Paper 99. University of Leeds, 1978, 40-55.

6. **Murchland, J. D.** Applications, history and properties of bi- and multi-proportional models / J. D. Murchland // Seminar at the London School of Economics, London, 1978, 43-53.

7. **Carruthers, G. A. P.** A historical review of the gravity and potential concepts of human interaction / G. A. P. Carruthers // Journal of the American Institute of Planners, 22, 1956, 94-102.

8. **Coelho, J. D.** An equivalence- theorem to integrate entropy-maxising submodels

within overall mathematical programming frameworks / J. D. Coelho, A. G. Wilson, // Geographical Analysis, IX, 1977, 160-173.

9. **Batty, M.** The method of residues in urban modeling / M. Batty, L. March // Environment and Planning A, 8, 1976, 189-214.

10. **Nathanson, M.** Information minimisation, marker transition and dynamic modeling / M. Nathanson // Environment and Planning A, 10, 1978, 879-888.