

# Методы математического моделирования для проектирования городской транспортной системы на досетевом уровне

**В. П. ФЕДОРОВ**, канд. физ.-матем. наук, завлабораторией математического моделирования функционально-пространственного развития городов Санкт-Петербургского экономико-математического института РАН,

**Л. А. ЛОСИН**, генеральный директор ЗАО «Санкт-Петербургский научно-исследовательский и проектный институт градостроительного проектирования (НИПИГрад)»



**В транспортных моделях при градостроительном проектировании было бы целесообразно применять методы досетевого уровня. В совокупности с методами геоинформационного анализа они предоставляют проектировщику ряд дополнительных показателей, способствуя ускорению принятия проектных решений и большей их обоснованности. Усовершенствовать традиционную схему транспортного моделирования можно путем внедрения двух дополнительных модулей: для диагностики функционирования транспортной системы и для синтеза укрупненных показателей ее работы.**

В современной проектной практике при территориальном планировании долгосрочные программы развития транспортных систем городов опираются, как правило, на вариантный («сценарный») подход, в рамках которого проектировщик-градостроитель разрабатывает варианты геометрии улично-дорожной сети или сети городского общественного транспорта (ГОТ) без привлечения математических методов. Соответственно, выбор сети оказывается обусловлен опытом эксперта-градостроителя, формирующего эти варианты для отбора, а модели применяются уже на этапе сравнения вариантов.

При данной схеме разработка вариантов развития сети основывается на заложенной в документации территориального планирования информации о перспективе (расселении, распределении мест приложения труда и иных центров тяготения, решениях по развитию транспортной инфраструктуры, не подлежащих ревизии), а также на численных показателях, полученных на этапе моделирования современного состояния транспортной системы и оценки качества ее работы. Методы моделирования досетевого уровня (т. е. без учета сетевых ограничений) и гео-

информационного анализа позволили бы проектировщику получить дополнительные данные, что способствовало бы более быстрому и обоснованному — за счет определения транспортных приоритетов территорий — принятию проектных решений.

## **Досетевые методы: расширение возможностей**

Обращение именно к досетевым моделям обусловлено тем, что «классическая» сетевая модель не реагирует на недостатки сетевой конфигурации, а лишь позволяет выявить узкие места при заданной структуре сети. Таким образом, использование досетевых моделей позволит определить потенциальный («идеализированный») спрос на внутригородские передвижения, не искаженный влиянием геометрии сети. Например, близко расположенные районы, разделенные водной преградой и потому практически недоступные друг для друга по сети, вполне могут быть взаимно привлекательны для жителей; но при расчете матрицы корреспонденций в сетевой модели получается, что затраты на такое передвижение велики и число корреспондентов между этими районами будет небольшим, из чего может быть сделан

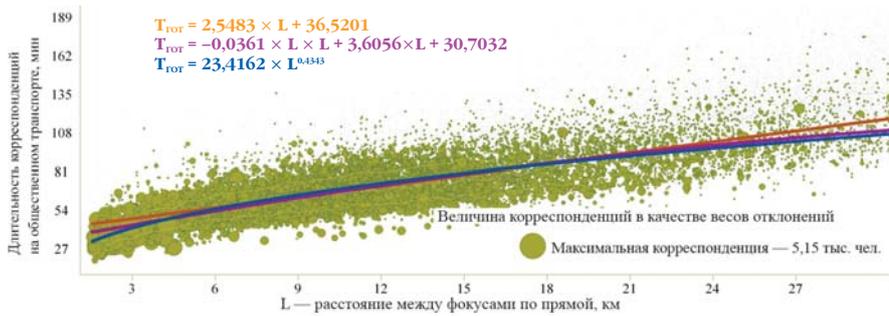
вывод о нецелесообразности строительства переправ для связи этих районов. Говоря о 20–30-летней перспективе многих проектов, тем более нельзя ориентироваться на конфигурацию сети, построение которой является одной из основных целей разработки этих проектов.

Мы предлагаем усовершенствовать подход к внесению корректировок в традиционную схему транспортного моделирования за счет двух дополнительных модулей: для диагностики функционирования транспортной системы и для синтеза укрупненных показателей ее работы.

Включение в расчетную схему этих модулей позволит:

- выявить транспортные проблемные зоны;
- выявить пассажирские корреспонденции, не удовлетворяющие социально значимым критериям транспортного обслуживания;
- определить требуемую номенклатуру видов транспорта, удовлетворяющую перспективному спросу на передвижения;
- определить укрупненные показатели работы системы общественного транспорта (пассажирская работа, протяженность сети по видам транспорта) или требуемый прирост этих показателей.

Для анализа возможностей использования досетевых методов мы определили зависимость времени передвижения на общественном транспорте по сети от расстояния «по воздуху», т. е. без учета геометрии сети. На примере Санкт-Петербурга были выявлены закономерности влияния конфигурации и параметров сети ГОТ на дальность и время передвижения, смоделированные без учета сете-



**Рис. 1. Построение зависимости длительности корреспонденций от расстояния между фокусами районов Санкт-Петербурга «по воздуху» с использованием линейной, квадратичной и степенной аппроксимаций**

вых ограничений. На рис. 1 представлена зависимость длительности корреспонденций на общественном транспорте, определенных по сети (мин) от расстояния между фокусами («характеристическими центрами») транспортных районов «по воздуху» (км). Можно ввести более адекватное определение расстояния, учитывающее необходимость преодоления непреодолимых объектов-преград, которые в рамках проекта будут признаны таковыми (например, акватория Финского залива между устьем Невы и дамбой). Объекты на диаграмме соответствуют межрайонным корреспонденциям; диаметр кружков пропорционален величинам этих корреспонденций. Для получения зависимостей произведены полные сетевые расчеты с учетом задержек, а также расчеты без учета сетевых ограничений для современной транспортной системы города.

Вычисляя или задавая такие зависимости, можно формировать матрицы с учетом предполагаемого влияния сети, т. е. при отсутствии или неполноте информации о ее конфигурации и параметрах. Виды функций для разных городов будут разными в зависимости от планировочной структуры, характеристик видов транспорта, плотности сети, а также от особенностей построения модели — степени агрегированности транспортного графа и системы транспортных районов.

Как показывают расчеты, потокораспределение, построенное по откалиброванной сетевой матрице, хорошо коррелирует с потокораспределением, построенным на основе досетевой матрицы с учетом расчетной аппроксимации; коэффициент корреляции между сетевой и досетевой матрицами составляет 0,9–0,96 (в зависимости от вида аппроксимации). При этом такие высокие значения коэффициента корреляции не означают совпадения показателей, соответствующих отдельным межрайонным связям.

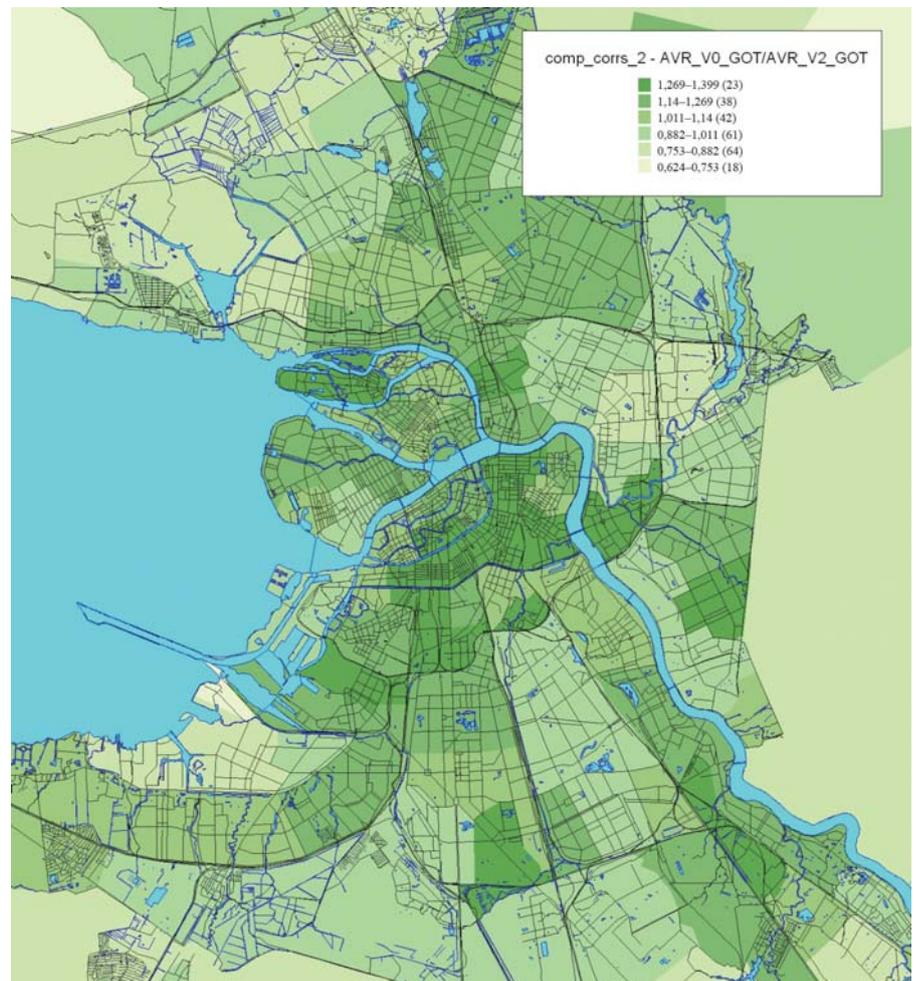
### Диагностическая модель транспортной системы

Для диагностики системы общественного транспорта мы предлагаем формировать диагностическую модель транспортной системы по результатам досетевого и сетевого расчетов.

В данном исследовании ставилась задача выявить проблемные в транспортном отношении зоны, а также не удовлетворяющие социально значимым критериям доступности пассажирские корреспонденции. Приняв в качестве территориальных кластеров транспортные районы, используемые для

формирования информационной базы транспортной модели города, мы рассчитали параметры дальности и времени передвижения по сети и «по воздуху» между пунктами отправления и прибытия по трудовым и деловым целям для всех пар районов (рис. 1).

Таким образом, проблемные транспортные зоны выявляются через отношение средневзвешенной скорости сообщения между районами для матрицы, полученной с использованием сети, к аналогичной скорости, полученной для досетевой матрицы (рис. 2). Чем больше «сетевая» скорость конкретной корреспонденции между районами отстает от «досетевой», тем более негативно сказываются на передвижении особенности конфигурации сети общественного транспорта. Картограмма отношения величин этих скоростей для каждого района характеризует степень его транспортной обеспеченности, а ее анализ помогает выявить территории, на которые в первую очередь нужно обратить внимание при проектировании. На картограмме отчетливо видны зоны (выделены более светлым тоном), жители которых в на-



**Рис. 2. Картограмма отношения «досетевой» скорости к скорости передвижения по сети (с использованием квадратичной аппроксимации)**

ибольшей степени испытывают затруднения при передвижении на общественном транспорте.

### Синтез укрупненных показателей работы городской транспортной системы

Моделирование на досетевом уровне также позволяет решать задачу синтеза укрупненных показателей работы транспортной системы, включая определение требуемой номенклатуры видов транспорта, удовлетворяющей заданному спросу на передвижения (в большей степени этот подход применим для долгосрочных проектов, когда возможности сетевого подхода ограничены высокой степенью неопределенности). Матрицы корреспонденций, полученные на досетевом уровне, могут использоваться при расчете таких показателей, как транспортная работа, длина сети в целом по городу и его укрупненным составным частям (поясам агломерации или планировочным направлениям). Эта информация может быть востребована в том числе для синтеза транспортных сетей, так как логическим продолжением синтеза укрупненных показателей может стать синтез самой транспортной сети, т. е. «выращивание» линий общественного транспорта по заданным параметрам.

Вообще расстановка приоритетов в развитии различных видов ГОТ в рамках проектных и стратегических документов является ключевой задачей городского транспортного планирования. В этом контексте актуальной представляется решаемая с помощью моделирования досетевого уровня задача распределения суммарной пассажирской работы по видам ГОТ (метрополитен, железная дорога, трамвай, новые виды транспорта и т. д.).

Методика использования модели досетевого уровня, которую мы предлагаем, состоит в следующем: для города с известным распределением населения и мест приложения труда на перспективу, с прогнозируемым уровнем подвижности на ГОТ, заложенным проектными документами (генеральным планом), следует оценить необходимый объем пассажирской работы по видам транспорта при заданной аппроксимационной функции соотношения между величинами (временем и дальностью передвижения), полученными с помощью методов сетевого и досетевого моделирования. Итем:

- матрицы дальности и продолжительности межрайонных корреспонденций, рассчитываемые по модели до-

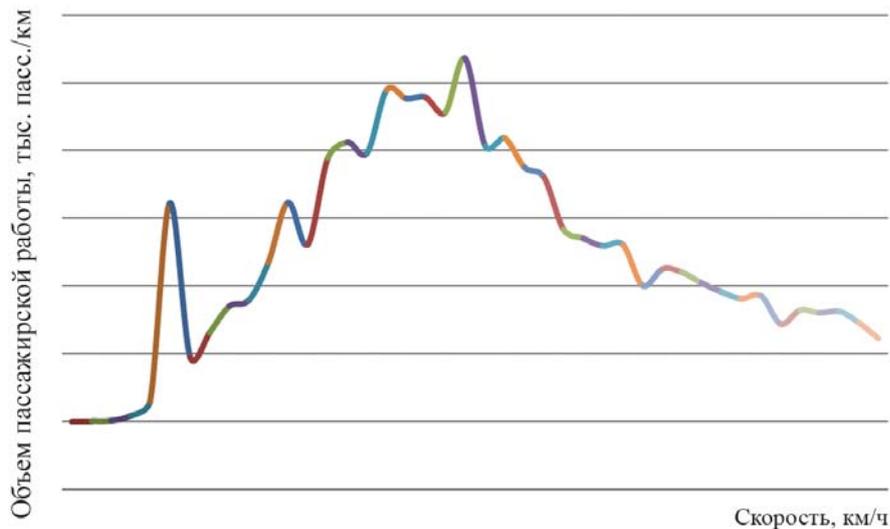


Рис. 3. Распределение объема пассажирской работы по скоростям для системы городского общественного транспорта г. Санкт-Петербурга; моделирование ситуации 2012 г.

сетевого уровня с использованием аппроксимации;

- матрицы объемов пассажирских межрайонных корреспонденций, рассчитываемые по модели досетевого уровня;
- эксплуатационные скорости движения по видам транспорта, предполагаемым к использованию (предварительный набор видов транспорта).

Если мы ограничиваемся только двумя видами ГОТ (скоростного и обычного со скоростями  $v^{(1)}$  и  $v^{(2)}$  соответственно), то задача разделения дальности каждой корреспонденции на доли, соответствующие видам транспорта, сводится к решению системы из двух уравнений; при этом число решаемых систем соответствует количеству возможных корреспонденций  $ij$ .

При аппроксимации зависимости времени передвижения по сети от расстояния «по воздуху» вида  $T = T(L)$  определение долей пассажирской работы по видам транспорта можно осуществлять следующим образом. Тангенс угла наклона графика аппроксимации в каждой точке есть величина, обратная скорости (в нашем случае количество минут на километр длины). Для всех видов аппроксимации эта величина равна значению производной от  $T$  по  $L$ , т. е.  $dT/dL$  (геометрический смысл значения производной от функции в произвольной точке — тангенс угла наклона касательной к графику функции в этой точке). Таким образом,

- для квадратичной аппроксимации вида  $T = a \times L^2 + b \times L + c$  получаем  $dT/dL = 2 \times a \times L + b$ ;
- для степенной аппроксимации вида  $T = a \times L^b$  получаем  $dT/dL = a \times b \times L^{b-1}$  и т. п.

Следовательно, для произвольной корреспонденции  $ij$  протяженностью  $L_0$  можно вычислить ее среднюю скорость  $v_0 = 60/(dT/dL | L_0)$ . Если принять за  $\alpha$  долю протяженности сети транспорта № 1, а за  $1 - \alpha$  — долю протяженности сети транспорта № 2, то получаем:

$$L^{(1)} = L_0 \times \alpha,$$

$$L^{(2)} = L_0 \times (1 - \alpha),$$

$$L_0 \times \alpha/v^{(1)} + L_0 \times (1 - \alpha)/v^{(2)} = L_0/v_0.$$

Сокращая обе части уравнения на  $L_0$  и умножая на  $v_0$ , приходим к следующему уравнению относительно  $\alpha$ :

$$\alpha (v_0/v^{(1)} - v_0/v^{(2)}) = 1 - v_0/v^{(2)}.$$

Определив  $\alpha$ , узнаем, в каких долях между видами транспорта распределится протяженность, а следовательно, и пассажирская работа для данной корреспонденции. Суммарную пассажирскую работу по видам транспорта можно определить по формуле

$$Q^{(1)} = \sum_{ij} (F_{ij} L^{(1)}_{ij}),$$

$$Q^{(2)} = \sum_{ij} (F_{ij} L^{(2)}_{ij}).$$

В общем случае, когда номенклатура используемых видов транспорта является искомой, суммарный объем пассажирской работы может быть распределен по скоростям. Для каждой корреспонденции, зная ее величину и протяженность, можно определить объем пассажирской работы, а также вычислить скорость, которая соответствует этой протяженности. Суммируя объем пассажирской работы при одинаковых скоростях, получаем указанное распределение (рис. 3), которое в дальнейшем может быть сгруппировано по видам ГОТ в зависимости от их скоростных возможностей, провозных способностей, стоимостных показателей и т. п.



Фото: СЕРГЕЙ ТЮРИН

Показатели, вычисленные на основе аппроксимационной функции, будут усредняться. Это негативно повлияет на качество уже имеющихся сетевых связей с высоким уровнем доступности, поэтому при определении перспективного спроса на пассажирскую работу важно учесть, что положение корреспондентов, условия передвижения которых находятся на приемлемом уровне, не должно ухудшаться. Соблюдение такого ограничения означает необходимость сохранения существующих затрат времени на передвижение между районами в тех случаях, когда они меньше предлагаемого проектом среднего показателя. Таким образом, затраты времени на пассажирские межрайонные корреспонденции, рассчитываемые по модели досетевого уровня для проектной ситуации, должны учитываться только в случаях, когда проектные условия передвижения оказываются лучше существующих, а также при появлении новых корреспонденций, обусловленных проектом территориального развития.

Нужно отметить, что представленный метод определения долей суммарной пассажирской работы по видам транспорта в большей степени применим при проектировании транспортных систем новых городов. На практике же, как правило, проектировщик имеет дело с задачами совершенствования и развития транспортных систем существующих городов с уже устоявшимися межрайонными связями, и определение приоритетов в развитии

различных видов ГОТ сводится к нахождению требуемого прироста показателей системы ГОТ по отношению к текущему положению. При этом, сравнивая корреспонденции, полученные для имеющегося сетевого и проектного досетевого вариантов расчета, можно вычислить прирост пассажирской работы не только по городу в целом, но и для каждого транспортного района отдельно.

Значения пассажирской работы, характеризующие долю участия каждого вида транспорта в обеспечении перевозок, уже позволяют получить представление о влиянии отдельных видов транспорта на функционирование системы ГОТ в целом при заданном наборе видов транспорта и системе расселения и распределения мест приложения труда. Переход же от значений пассажирской работы к длине сети для каждого вида ГОТ не имеет однозначного решения, так как неизвестна структура сети и, следовательно, распределение корреспонденций по ее элементам. Для перехода от показателей пассажирской работы к длинам сети может быть использована гипотеза изменения удельной пассажирской работы по видам транспорта, согласно которой существует максимум удельной пассажирской работы, обусловленный максимальной эффективностью работы транспорта определенного вида при заданной планировочной структуре города. Определение длины сети исходя из значений пассажирской работы может базироваться также на нормативных диапазо-

нах пассажиропотоков по видам транспорта.

Подход к определению укрупненных показателей функционирования системы ГОТ может применяться также для определения структуры улично-дорожной сети, когда вместо пассажирских корреспонденций рассматриваются корреспонденции на автомобильном транспорте. При этом вместо пассажирской работы следует рассматривать транспортную работу, вместо видов транспортных средств — категории элементов улично-дорожной сети, различающиеся скоростным режимом движения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мягков В. Н., Пальчиков Н. С., Федоров В. П. Математическое обеспечение градостроительного проектирования / под ред. Б. Л. Овсевича. Л.: Наука, 1989.
2. Стрельников А. И. Программа определения потенциальной транспортной потребности по воздушным линиям расстояния // Автоматизация проектирования городских транспортных систем. Вып. 4. М.: Стройиздат, 1977.
3. Федоров В. П., Булычева Н. В., Пахомова О. М., Лосин Л. А. Модель формирования межрайонных корреспонденций в транспортных системах крупных городов // Транспорт РФ. 2008. № 3/4.
4. Федоров В. П., Пахомова О. М., Лосин Л. А., Булычева Н. В. Анализ проблем транспортной системы центра крупного города: опыт применения методов математического моделирования // Управление развитием территории. 2009. № 4.