

# Формирование вариантов развития городских транспортных сетей: разработка метода

В. П. ФЕДОРОВ, канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией математического моделирования функционально-пространственного развития городов Санкт-Петербургского экономико-математического института РАН



**Транспортно-градостроительное моделирование, как правило, осуществляется в два этапа: сначала формируется матрица межрайонных передвижений (корреспонденций), затем строится потокораспределение в сети, реализующее эту матрицу. В дальнейшем на основе таких модельных комплексов ведется разработка вариантов развития транспортной сети — процесс, сопряженный с необходимостью учитывать множество конкретных, иногда трудно формализуемых обстоятельств, остающихся за рамками используемых моделей. Средства математического моделирования, представленные ниже, могут облегчить проектировщикам выполнение этой задачи.**

Информационно-программные комплексы по транспортно-градостроительному моделированию — это важный инструмент, применяемый при разработке генеральных планов городов, комплексных и отраслевых транспортных схем, ориентированных на долгосрочную перспективу.

## Матрица корреспонденций

В соответствии с традиционными подходами к транспортному моделированию будем считать систему расселения и систему мест приложения труда заданными в виде совокупности транспортных районов с закрепленными объемами отправок и прибытий при передвижениях с трудовыми целями (центры районов — фокусы потокообразования и потокопоглощения).

Для осуществления первого этапа — формирования матриц корреспонденций — можно использовать метод, предложенный в работе [1]. Согласно ему, сначала определяется протяженность корреспонденций как расстояние между фокусами на основе геометрии их расположения (если необходимо, можно учитывать наличие преград). Затем рассматривается построение и использование функции  $T = T(L)$ , с помощью которой осуществляется переход от расстояний между фокусами к затратам времени на совершение корреспонденций между ними. Эта функция отражает общий уровень скоростных возможностей

проектируемой транспортной системы, величина  $T$  показывает, какие затраты времени в среднем потребуются для совершения корреспонденции длиной  $L$ . Далее традиционными методами расчета корреспонденций, в которых используются модели тяготения, строится матрица межрайонных корреспонденций.

Эта матрица отражает спрос на услуги транспортной сети. Таким образом, на следующем этапе возникает необходимость разработки методов построения сети, которая удовлетворила бы этот спрос. В работе [2] предлагается графоаналитический метод, цель которого — отыскать транспортную сеть такой ориентации и плотности, которая обеспечила бы основной массе корреспонденцирующих прямолинейное движение. Для этого на территорию города накладывается регулярная сетка, в узлах которой на основе имеющихся корреспонденций строятся векторные диаграммы, показывающие интенсивность тяготения корреспондентов к целевым объектам по восьми направлениям (вдоль сторон и диагоналей сетки). Эти диаграммы используются затем при разработке вариантов транспортной сети для назначения плотности сети, выбора направлений и пропускных способностей ее магистралей.

В данном случае за желанием обеспечить прямолинейное движение стоит стремление к экономии затрат времени на передвижение. Но здесь следует

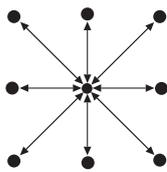
иметь в виду тот факт, что городской транспорт весьма неоднороден как по конфигурации и плотности сети, так и по скоростным параметрам различных его видов. Кратчайший по времени путь далеко не всегда прямолинеен (особенно для пассажиров общественного транспорта), поэтому метод, рассматриваемый ниже, изначально базируется на том, что каждый корреспондент стремится выбрать для себя кратчайший по времени путь следования, а геометрия путей и геометрия формируемой сети являются следствием этого выбора.

В основе предлагаемого метода лежит известный прием: прежде чем обустроить дорожки в парке или сквере, лучше дать возможность ходить где кому удобно, а потом использовать образовавшиеся тропинки при планировке дорожек. Для нас в этом случае важно одно обстоятельство: «тропинка» каждой корреспонденции будет в каких-то местах отдельной, а где-то может совпадать с «тропинками», проложенными другими корреспонденциями (или пролегать близко к ним). Если считать, что по уже имеющейся «тропинке» двигаться быстрее и комфортнее, то некоторым участникам движения будет выгодно изменить свою траекторию движения, объединив ее в каком-то месте с траекториями других участников (воспользоваться уже имеющейся «тропинкой»). И хотя длина траектории при этом, вероятно, увеличится, можно выиграть время за счет большей скорости движения и при этом сделать «тропинку» на общем участке еще более «протоптанной» и, следовательно, привлекательной. Именно благодаря этому обстоятельству и происходит стихийное образование хорошо утопанных «тропинок».

Для модельной реализации такого подхода поступим следующим образом.

Покроем территорию транспортных районов регулярной прямоугольной сеткой с достаточно мелким шагом.

Каждый узел этой сетки свяжем дугами с восемью соседними узлами (параллельно сторонам и диагоналям ячеек сетки).



Каждый из корреспондентов, стартуя из своего фокуса отправления, попадает в ближайший к фокусу узел сетки и далее двигается кратчайшим с точки зрения затрат времени путем по элементарным дугам сетки в ближайший к своему фокусу прибытия узел, где покидает сетку. Таким образом, спрос на транспортные услуги с уровня матрицы корреспонденций переносится на сетку, в результате чего на ее дугах образуются потоки.

**Формирование сети**

Затраты времени на дугах сетки определим следующим образом. Обозначим как  $R_i$  количество корреспондентов, проследовавших через узел  $i$ . Для каждой дуги  $(i, j)$  ( $j$  — один из восьми соседних с  $i$  узлов) вычислим величину  $Q_{ij} = (R_i + R_j)/2$ , которую рассмотрим как оценку потенциального спроса на использование дуги. Будем считать, что скорость движения по каждой дуге является монотонно возрастающей функцией потенциального спроса на использование этой дуги, т. е.  $V_{ij} = V(Q_{ij})$ . Другими словами — что увеличение спроса делает экономически обоснованной организацию движения более скоростного транспорта с большей провозной способностью.

Такая реакция транспортной инфраструктуры на увеличение спроса будет стимулировать объединение потоков индивидуальных корреспонденций на некоторых участках в более крупные агрегированные потоки. Для формирования этих агрегатов организуем следующий итерационный процесс. На начальном шаге положим скорость движения на всех дугах одинаковой, т. е.  $V_{ij} = V_{min}$  (например, скорости пешехода). После того как все корреспонденты проследуют по своим путям следования, на дугах сетки возникнут потоки, появятся ненулевые значения  $R_i$  и величины  $V_{ij}$  возрастут. В тех местах, где пути следования разных корреспонденций пройдут по одним и тем же дугам, этот рост будет еще более значительным за счет объединения потоков. Естественно, повышение скорости снизит затраты времени на передвижение для этих корреспондентов.

Для нас существенно то, что на следующей итерации для некоторых участников других корреспонденций окажется более выгодным изменить свои текущие траектории, чтобы воспользоваться теми участками сетки, на которых увеличилась скорость. В результате на этих участках возрастут потоки, величина  $Q_{ij}$  и скорость, что сделает их еще привлекательнее.

Таким образом, исходная сетка играет роль своеобразной основы, на которой в ходе итерационного процесса происходит стихийная кристаллизация «скелета» транспортной сети, набранного из нагруженных потоками элементарных дуг исходной сетки.

**Экспериментальное построение вариантов сети**

Экспериментальное исследование вышеописанного подхода было проведено на примере Санкт-Петербурга.

В качестве исходной информации взята система из 246 транспортных районов, точнее, система их центров — фокусов потокообразования и потокопоглощения. Объемы отправок и прибытий соответствовали расчетному часу утреннего периода трудовых корреспонденций. Расстояния между фокусами определялись по прямой с учетом единственного препятствия — акватории Финского залива. В качестве функции  $T = T(L)$  был взят один из вариантов аппроксимации из работы [1]:

$$T = 21,78 \times L^{0,476},$$

где  $L$  — дальность корреспонденции, км;  
 $T$  — продолжительность корреспонденции на общественном транспорте, мин;

а в качестве функции тяготения для расчета корреспонденций —

$$p(T) = \exp(-0,05 \times T).$$

Рассчитанная по таким исходным данным матрица корреспонденций для общественного транспорта имела следующие средние параметры:  $L = 10,6$  км,  $T = 58,1$  мин, скорость транспорта  $V_{тран} = 60 / (dT/dL|_{10,6}) = 60 / (21,78 \times 0,476 \times 10,6^{0,476-1}) = 19,9$  км/ч.

Сетка, покрывающая территорию транспортных районов, имела шаг 100 м и габариты 100 × 103 км, количество узлов — более 1 млн, элементарных дуг — около 8 млн (длиной по 100 м вдоль сторон сетки и по ≈ 141,42 м вдоль диагоналей).

Функция  $V(Q)$  имела следующий вид:

$$V = V_{max} / (1 + (V_{max} - V_{min}) / V_{min} \times \exp(-a \times Q^b)),$$

где  $V_{max} = 30$  км/ч,  $V_{min} = 4,5$  км/ч.

Параметры  $a$  и  $b$  определяют характер монотонности функции  $V$ , о них будет сказано далее. Вид функции  $V(Q)$  при  $a = 0,03$  и  $b = 0,45$  изображен на рис. 1.

На рис. 2–4 представлены картограммы потоков на первых трех итерациях. Поскольку на первой скорости движения на дугах одинакова, пути следования для всех корреспондентов проходят по узлам сетки, расположенным около прямых линий, соединяющих фокусы отправления и прибытия. Объединение потоков индивидуальных корреспонденций в этой ситуации происходит в местах их геометрического наложения. Величины потоков относительно невелики, а общее количество используемых дуг около 1,5 млн.

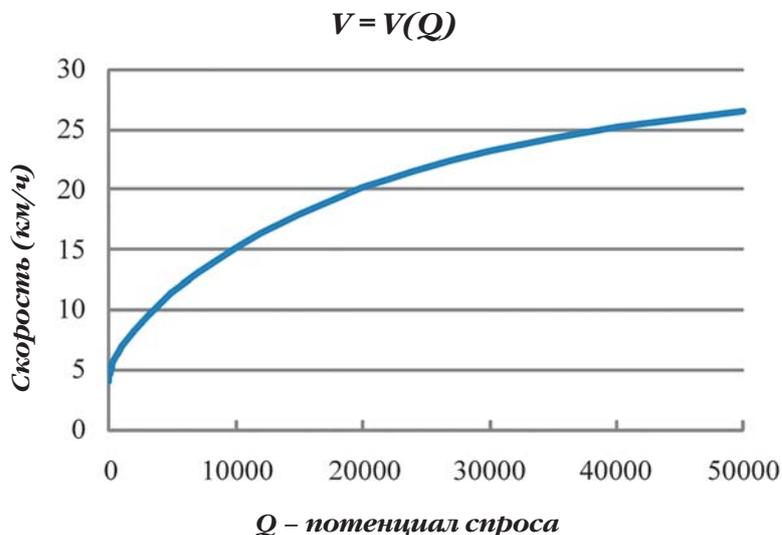


Рис. 1. Рост скорости передвижения при увеличении потенциала спроса Q

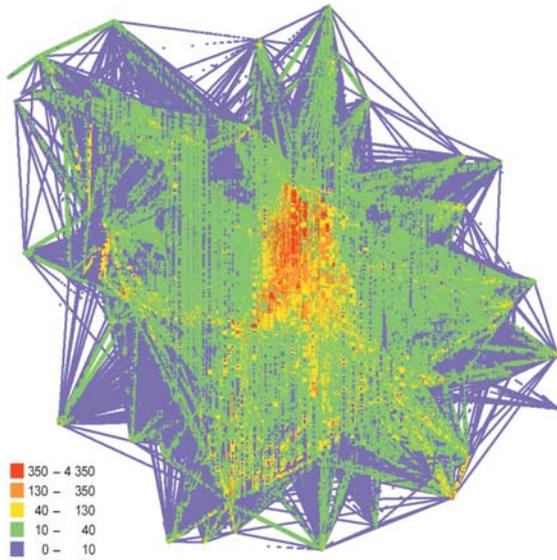


Рис. 2. Картограмма потоков после первой итерации

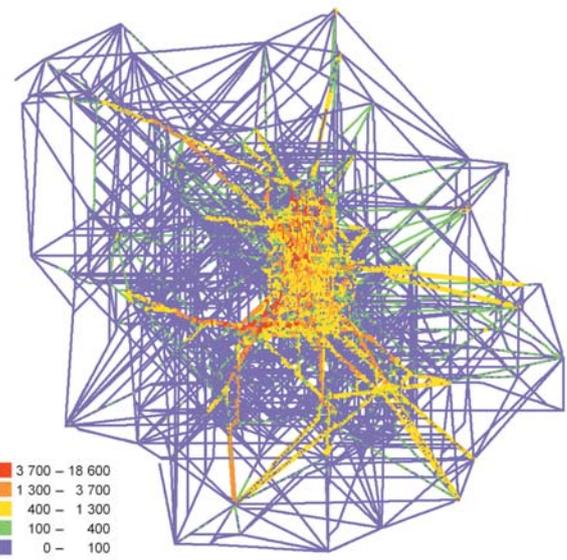


Рис. 3. Картограмма потоков после второй итерации

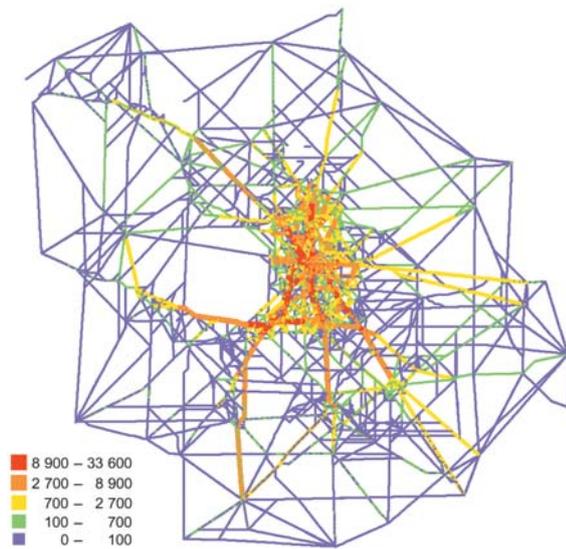


Рис. 4. Картограмма потоков после третьей итерации

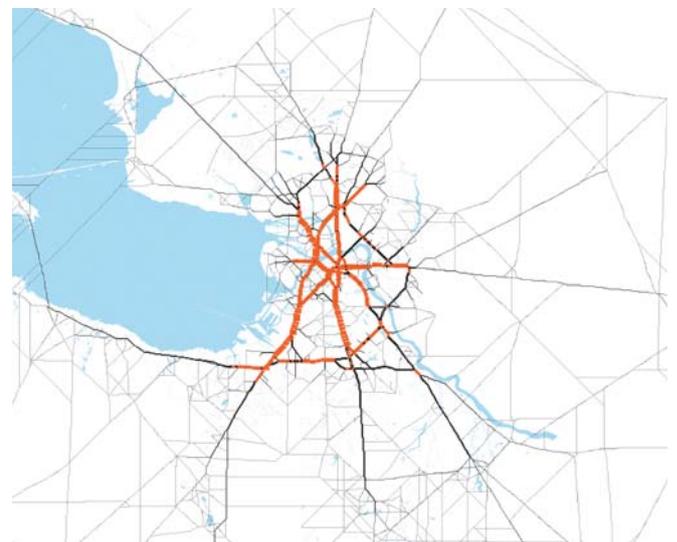


Рис. 5. Картограмма потоков после 36 итераций

На второй итерации начинается агрегирование потоков, их величина возрастает, а количество используемых дуг сетки снижается до 236 тыс.

На третьей итерации агрегирование потоков продолжается, количество используемых дуг сетки снижается до 83 тыс., начинает прорисовываться «скелет» формируемой транспортной сети.

На рис. 5 представлен результат работы после 36 итераций, когда агрегирование потоков практически прекратилось. Максимальная величина потока — около 43 тыс. пасс./ч. Количество используемых дуг сетки — около 40 тыс., протяженность сложившейся сети — 2846 км в двухпутном исчислении. Красным цветом выделено множество дуг, на которых скорость оказалась выше 20 км/ч. Протяженность этой скоростной части сети — около 240 км (8,4% общей протяженности).

Понятно, что ключевую роль в формировании результата играет функция  $V$ , точнее, характер ее роста от  $V_{\min}$  до  $V_{\max}$ , определяемый параметрами  $a$  и  $b$ . Назначение параметра  $b$  ( $b < 1$ ) — снизить от-

носительный перепад значений  $Q$  и сделать функцию  $V$  более пологой. На рис. 6 изображено семейство функций  $V(a, Q)$  с разными значениями параметра  $a$  и фиксированным значением  $b = 0,45$ .

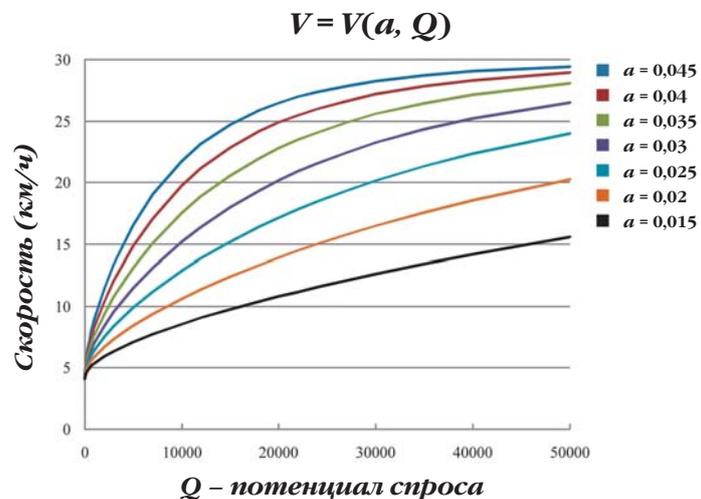


Рис. 6. Вид функции  $V$  при различных значениях параметра  $a$



Рис. 7. Вариант сети при  $a = 0,015$



Рис. 8. Вариант сети при  $a = 0,045$

На рис. 7, 8 приведены картограммы потоков для вариантов сети при крайних значениях параметра  $a = 0,015$  и  $a = 0,045$ .

Иллюстрации позволяют убедиться, что при малых значениях  $a$  агрегирование в основном происходит за счет геометрической близости путей следования корреспондентов. В результате получается сеть с незначительным количеством дуг, имеющих большую величину потоков и, соответственно, высокую скорость. При этом остается очень много малозагруженных дуг с низкой скоростью движения. Как следствие — большая общая протяженность сети и низкая среднесетевая скорость.

При больших значениях  $a$  происходит быстрое увеличение скорости уже при относительно небольших потоках, в результате чего образуется много дуг, на которых скорость оказывается достаточно высокой (близкой к максимальной). В этой ситуации процесс агрегирования, т. е. перераспределения потоков между этими дугами, быстро ослабевает. Таким образом, получается сеть с большим количеством скоростных участков и, соответственно, с высокой среднесетевой скоростью, но средний уровень загрузки скоростных участков при этом оказывается невысоким. Если учесть, что организация скоростного транспорта требует значительных затрат, можно сделать вывод о низкой экономической эффективности такой сети.

В таблице приведены интегральные характеристики вариантов сети, построенных при разных значениях параметра  $a$ .

Как следует из приведенных в таблице значений, для формирования сети общественного транспорта наиболее интересными представляются варианты сети для  $0,025 < a < 0,035$ . При  $a < 0,025$  сеть имеет значительную протяженность и недостаточную скорость движения (напомним, что средняя скорость транспорта при расчете матрицы корреспонденций составляла 19,9 км/ч). При  $a > 0,035$  общая протяженность сети снижается, но активно растет доля скоростной части сети, в то время как рост объема пассажирской работы этой части сети замедляется и средняя величина потока на ней снижается. Таким образом, и в том, и в другом случае сеть малоэффективна.

### Варианты сети для разных видов транспорта

Напомним также, что при формировании сети используется самая общая и простая информация о системах расселения и местах приложения труда. Полученная сеть с обобщенными пассажирскими потоками на ней может быть использована как своего рода «сырье» для разработки вариантов развития сетей отдельных видов общественного транспорта.

Аналогичным образом можно формировать сеть индивидуального автомобильного транспорта. При этом нужно иметь в виду, что на одного участника движения в данном случае требуется пространства на порядок больше, чем на одного пассажира общественного транспорта, следовательно, образование больших потоков в процессе агрегирования может затруднить пространственную реализацию

Таблица. Интегральные характеристики вариантов сети

$a$	$L$	$V$	$Ls, \%$	$Ps, \%$	$Fn$	$Fs$
0,015	4855	12,5	1,0	24,0	6271	27514
0,020	3915	15,3	2,0	45,4	3498	20550
0,025	3227	17,6	5	61,2	2224	14183
0,030	2846	19,3	8,4	70,1	1430	9600
0,035	2663	21,1	11,6	76	1118	8417
0,040	2457	22,2	15,5	79,2	855	6406
0,045	2312	23,3	19,8	82,5	667	4945

Примечание.  $L$  — протяженность сети в двухпутном исчислении (км);  $V$  — среднесетевая скорость (км/ч);  $Ls$  — протяженность скоростной (выше 20 км/ч) части сети в процентах от  $L$ ;  $Ps$  — доля пассажирской работы (пасс. × км), выполняемой скоростной частью сети;  $Fn$  — средняя величина потока на низкоскоростной части сети;  $Fs$  — средняя величина потока на скоростной части.

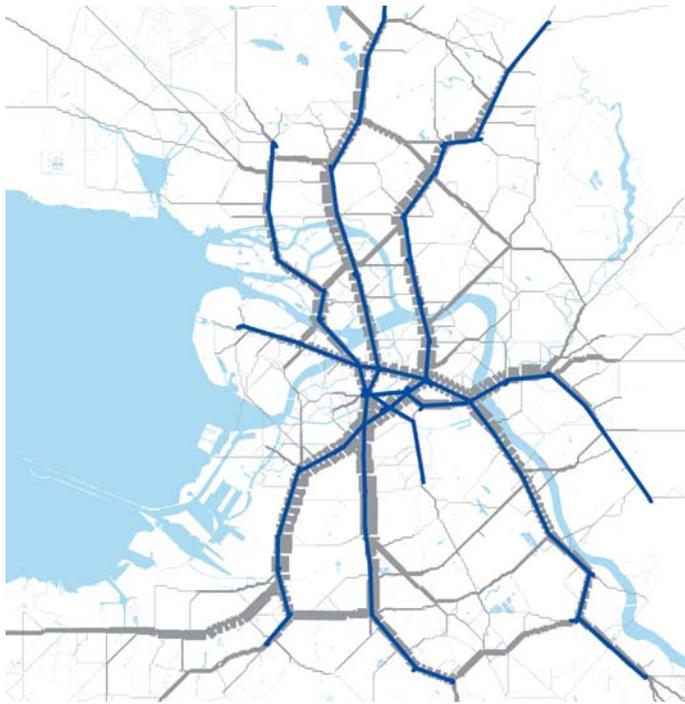


Рис. 9. Структура сети и картограмма потоков для варианта  $V = 28$  км/ч

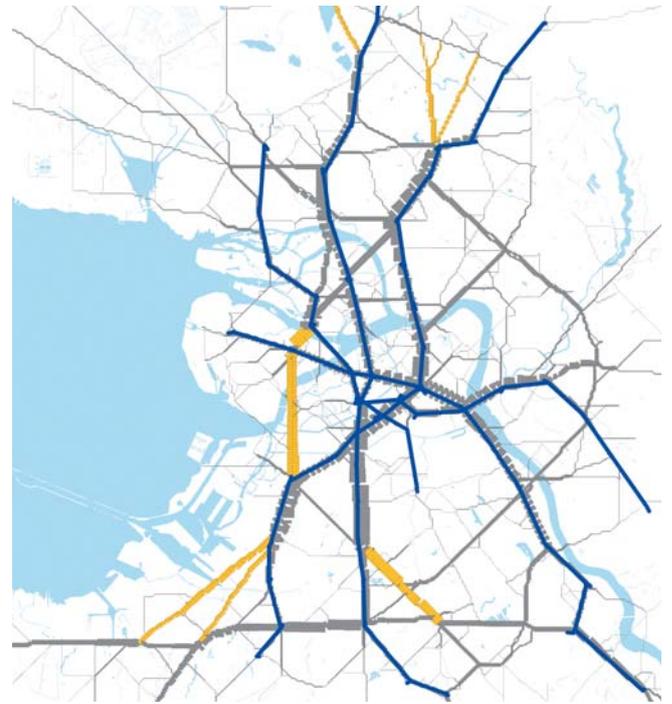


Рис. 10. Структура сети и картограмма потоков для варианта  $V = 15$  км/ч

соответствующих элементов сети. Таким образом, функция  $V(Q)$  должна в этом случае расти быстрее и приближаться к  $V_{max}$  при меньших, чем для общественного транспорта, значениях  $Q$ . Более того, можно провести зонирование территории и назначить свои параметры функции  $V$  для каждой зоны, чтобы обеспечить приемлемые уровни агрегирования потоков в каждой из них.

Также нужно отметить, что конфигурация стихийно образующихся агрегированных потоков обладает некоторой неустойчивостью. Понятно, что эта конфигурация может несколько меняться при изменении не только параметров функции  $V$ , но и системы районирования, и шага сетки, и — в какой-то мере — объемов отправок и прибытий. При этом на практике сеть уже имеется, и интерес представляет именно формирование вариантов ее развития, а не построение ее каждый раз заново.

Для учета указанных обстоятельств подойдет следующий прием. На начальном этапе на исходной сетке можно выделить те дуги, геометрия которых наиболее близка к геометрии существующей сети, и на них назначить такие же скорости передвижения, как у элементов существующей сети. Таким образом, на исходной сетке получится образ существующей сети, на который будет накладываться агрегирование потоков. Уровень агрегирования потоков на этих выделенных дугах сетки будет зависеть от того, насколько они отвеча-

ют структуре корреспонденций, т. е. насколько они будут востребованы участниками движения.

Можно усложнить этот прием, назначая на выделенных дугах величины скоростей ниже, чем на существующей сети, но выше, чем пешеходная скорость, и считать, что эти величины скоростей являются начальными значениями, которые могут расти в процессе агрегирования потоков. Если эти дуги отвечают потребностям корреспондентов, величина потоков и скоростей на них будет расти, в противном случае агрегирование произойдет на других дугах, выявляя те места, где необходимо развивать существующую сеть. Меняя начальные величины скоростей на дугах существующей сети, можно регулировать степень ее влияния на результат.

Для иллюстрации этого приема на рис. 9, 10 приведены результаты двух вариантов построения сети, где в качестве образа существующей сети взята сеть метрополитена (показана синим цветом). В первом варианте начальная скорость на выделенных дугах составляла 28 км/ч, во втором — 15 км/ч. Понятно, что в первом варианте высокая (почти максимальная) скорость на выделенных дугах способствовала агрегированию потоков прежде всего на них. Крупные агрегаты, возникшие в других местах, выступают практически как дополнение к этой выделенной сети.

Во втором варианте более низкая начальная скорость (15 км/ч) на выделенных дугах ослабила их агрегирующую

способность и создала возможность возникновения не только дополняющих, но и конкурирующих агрегатов. Особенно заметно перераспределение потока на возникшую трассу, соединяющую станции «Нарвская», «Василеостровская» и «Спортивная». Увеличилось ответвление потока от ст. «Электросила» в сторону Купчино. Появилось ответвление потока от ст. Кировский завод на юго-запад и от ст. «Политехническая» на север и т. п.

Следовательно, меняя параметры образа существующей сети на исходной сетке, можно формировать варианты развития сети более консервативного или более инновационного характера.

Все приведенные картограммы носят чисто иллюстративный характер. Поскольку целью экспериментальных расчетов являлась только проверка работоспособности предлагаемого метода формирования сети, исходные данные, используемые в расчетах, а соответственно, и результаты расчетов являются в известной степени условными.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Федоров В. П., Лосин Л. А. Методы математического моделирования для проектирования городской транспортной системы на досетевом уровне // Транспорт РФ. 2012. № 2 (39).
2. Стрельников А. И. Программа определения потенциальной транспортной потребности по воздушным линиям расстояния // Автоматизация проектирования городских транспортных систем. Вып. 4. М.: Стройиздат, 1977.