

А. В. Мартыненко, К. К. Ваколюк

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСЩЕПЛЕНИЯ МЕЖДУГОРОДНИХ ПАССАЖИРОПОТОКОВ С УЧЕТОМ РАСПИСАНИЯ И ЗАТРАТ НА ВНУТРИГОРОДСКИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

Аннотация. Предложена модель для оценки обобщенной стоимости индивидуальных межмуниципальных поездок. Данная модель интегрирует различные аспекты, включая затраты на внутригородское перемещение и предпочтения пассажиров относительно времени отправления и прибытия. Такой подход позволяет точнее определить выбор пассажирами вида транспорта, маршрута и конкретного рейса. Модель обладает гибкостью, возможностью модификации и использования в рамках традиционной четырехшаговой модели прогнозирования транспортного спроса. Рассмотрены методы определения калибровочных параметров, включая анализ входных данных, полученных из социологических опросов и открытых источников, что позволяет детально рассчитать параметры, связанные с внутригородскими перемещениями.

Ключевые слова: модель расщепления пассажиропотоков, предпочтительное время отправления и прибытия, транспортный спрос, межмуниципальные пассажиропотоки.

Для цитирования: Мартыненко, А. В. Моделирование расщепления междугородних пассажиропотоков с учетом расписания и затрат на внутригородские перемещения / А. В. Мартыненко, К. К. Ваколюк // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 2. – С. 143–155. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_143.

Введение

Моделирование пассажиропотоков – важный элемент при планировании развития транспортной инфраструктуры в регионах. Традиционно для этих целей применяется четырехшаговая модель транспортного спроса, которая может совершенствоваться за счет применения различного математического аппарата. Вопрос формирования обобщенной стоимости передвижения пассажиров важен на многих из этапов моделирования, в том числе при распределении поездок по видам транспорта.

В обобщенную стоимость междугородних поездок принято включать затраты на межмуниципальную поездку на конкретном виде транспорта, время в пути и переменную, отвечающую за индивидуальное предпочтение того или иного вида транспорта. Но такой подход не в полной мере описывает поведение пассажиров. Так, время отправления и прибытия для многих пассажиров является одним из ключевых факторов при выборе вида транспорта [1].

Также на принятие решения влияют и затраты на внутригородское перемещение. Например, индивидуум может быть проще осуществить межмуниципальную поездку на более дорогостоящем виде транспорта, находящемся в шаговой доступности, чем добираться на городском общественном транспорте до более дешевого. Так, выбор вида междугороднего транспорта зависит не только от его собственных качеств, но и от качеств внутригородских транспортных систем. Неверный выбор среди альтернатив может повлечь дополнительные финансовые и временные затраты [2, 3].

Под расщеплением пассажиропотоков подразумеваются задача расщепления корреспонденций по улично-дорожной сети [4–6], а также задача расщепления по видам транспорта и рейсам. Так как в настоящей статье рассматриваются межмуниципальные поездки на общественном транспорте, то далее пойдет речь только о второй задаче, которой посвящено большое количество работ. Так, в [7] рассматривается применение синтетической гравитационной модели с показательно-степенной функцией тяготения для расчета расщепления пассажиропотока по разным видам городского общественного транспорта. В [8] была предложена методика расчета расщепления, основанная на делении пассажиров на группы по уровню доходов и на вычислении значений обобщенного критерия для каждого вида транспорта. В работе [9] была предпринята попытка определить факторы, влияющие на выбор вида транспорта для 112 европейских городов.

Обзор литературы показывает, что, несмотря на обширные исследования обобщенной стоимости поездки и моделирования пассажиропотоков, лишь в ограниченном количестве работ учитывается влияние предпочтительного времени отправления и прибытия (обзор основных результатов ис-

\check{t}_k^m – все затраты времени на перемещение в городе прибытия (от места высадки из междугородного транспорта до конечного пункта поездки);

\hat{c}_k^m – все финансовые затраты на перемещение в городе отправления (от начального пункта поездки до места посадки в междугородный транспорт);

\check{c}^m – стоимость поездки в междугородном транспорте;

\check{c}_k^m – все финансовые затраты на перемещение в городе прибытия (от места высадки из междугородного транспорта до конечного пункта поездки);

\hat{T}^m – время отправления междугородного транспорта из города отправления (тогда $\hat{T}^m - \hat{t}_k^m$ представляет собой время отправления из начального пункта поездки);

\check{T}^m – время прибытия междугородного транспорта в город прибытия (тогда $\check{T}^m - \check{t}_k^m$ представляет собой время прибытия в конечный пункт поездки);

$\hat{S}_k(t)$ – затраты индивида, появляющиеся в результате того, что ему для совершения междугородной поездки необходимо отправиться из начального пункта в момент времени t ;

$\check{S}_k(t)$ – затраты индивида, появляющиеся в результате того, что междугородная поездка обеспечивает прибытие в конечный пункт именно в момент времени t ;

δ_k – дамми-переменная, позволяющая включить в обобщенную стоимость влияние расписания и разбивающая множество индивидов на две категории в зависимости от того, что для них важно в расписании: время отправления или время прибытия:

$$\delta_k = \begin{cases} 1, & \text{если для индивида } k \text{ важно время отправления,} \\ 0, & \text{если для индивида } k \text{ важно время прибытия;} \end{cases}$$

ω_k^m – свободный член, репрезентирующий затраты индивида k , связанные с уровнем комфорта и безопасности транспорта m ;

$\alpha_k, \beta_k, \gamma_k, \varphi_k, \mu_k, \eta_k$ – весовые коэффициенты, определяющие индивидуальную (субъективную) значимость соответствующих параметров поездки.

Финансовые и временные затраты на внутригородские перемещения в городах отправления и прибытия зависят от используемого междугородного транспорта, поскольку, например, железнодорожный вокзал и автовокзал могут находиться в разных местах, следовательно, при выборе автобуса или поезда для междугородной поездки затраты на внутригородские перемещения будут различаться.

Каждая из функций $\hat{S}_k(t)$ и $\check{S}_k(t)$ – «глубоко индивидуалистична». Удобство/неудобство расписания транспорта зависит от жизненного расписания индивида, поэтому, данные функции могут быть полимодальными. Например, если основная цель поездки в большой город – визит к врачу, назначенный на 11:00, то расписание междугородного транспорта, обеспечивающее прибытие в конечный пункт в 10:45, будет выгоднее расписания, обеспечивающего прибытие в 10:20. Однако при этом прибытие в 10:00 может оказаться более предпочтительным, чем в 10:20, поскольку в этом случае появляется достаточно времени чтобы, например, посетить какой-нибудь магазин или кафе перед визитом к врачу (рис. 2).

Однако для большинства поездок $\hat{S}_k(t)$ и $\check{S}_k(t)$ все-таки являются унимодальными. То есть существует момент времени, который наилучшим образом подходит индивиду для отправления (прибытия). Обозначим такой наиболее подходящий момент отправления как $\hat{\theta}^k$, а наиболее подходящий момент прибытия как $\check{\theta}^k$.

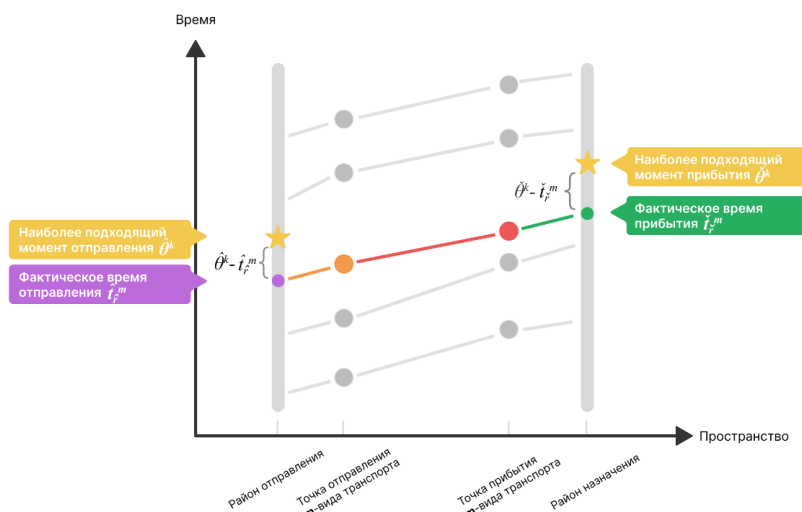


Рис. 2. Выбор альтернативы вида транспорта и рейса

Будем считать функции $\hat{S}_k(t)$ и $\check{S}_k(t)$ унимодальными и удовлетворяющими условиям:

$$\hat{S}_k(t) > 0 \text{ при } t \neq \hat{\theta}^k \text{ и } \hat{S}_k(\hat{\theta}^k) = 0;$$

$$\check{S}_k(t) > 0 \text{ при } t \neq \check{\theta}^k \text{ и } \check{S}_k(\check{\theta}^k) = 0.$$

Функции $\hat{S}_k(t)$ и $\check{S}_k(t)$ могут быть выбраны различными способами. Их конкретный (наиболее подходящий) вид может быть установлен только в результате калибровки модели на реальных данных. Сейчас лишь отметим, что наиболее простая спецификация этих функций имеет вид [15]

$$\hat{S}_k(t) = |t - \hat{\theta}^k|, \quad \check{S}_k(t) = |t - \check{\theta}^k|.$$

Этап II. Обобщенная стоимость для слоя спроса

Множество всех индивидов разбивается на подмножества – слои спроса. Разбиение производится с учетом цели поездки, а также половозрастной и социальной структуры пассажиров. Предполагаем, что для всех индивидов, входящих в слой спроса, весовые коэффициенты $\omega_k^m, \alpha_k, \beta_k, \gamma_k, \varphi_k, \mu_k, \eta_k$ являются одинаковыми.

Пусть P – множество всех пассажиров, совершающих поездку из $\hat{\Gamma}$ в $\check{\Gamma}$ и \mathcal{Q} – разбиение множества P на слои спроса (рис. 3), т.е.

$$P = \bigcup_{L \in \mathcal{Q}} L \text{ и } L_1 \cap L_2 = \emptyset \quad \forall L_1, L_2 \in \mathcal{Q}.$$

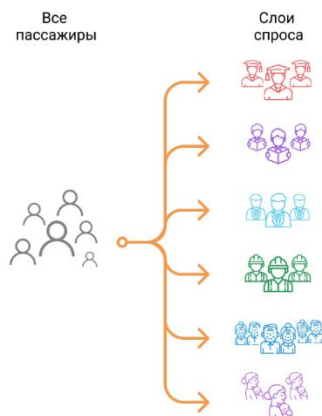


Рис. 3. Слои спроса

Чтобы учесть влияние расписания, каждый слой спроса разобьем еще на два непересекающихся подмножества: пассажиры, для которых важно время отправления, и пассажиры, для которых важно время прибытия. Эти множества будем называть полуслоями, т.е.

$$L = \hat{L} \cup \check{L} \quad \forall L \in \mathcal{L},$$

где

$$\hat{L} = \{k \in L | \delta_k = 1\}, \quad \check{L} = \{k \in L | \delta_k = 0\}.$$

Также предполагаем, что для всех индивидов из одного слоя L функции $\hat{S}_k(t)$ и $\check{S}_k(t)$ имеют одинаковый вид, а от k зависят только наиболее подходящие моменты отправления и прибытия $\hat{\theta}^k$ и $\check{\theta}^k$. Поэтому далее эти функции будем записывать в виде

$$\hat{S}_k(\hat{T}^m - \hat{t}_k^m) = \hat{S}_L(\hat{T}^m - \hat{t}_k^m - \hat{\theta}^k);$$

$$\check{S}_k(\check{T}^m + \check{t}_k^m) = \check{S}_L(\check{T}^m + \check{t}_k^m - \check{\theta}^k).$$

Таким образом, для каждого пассажира $k \in \hat{L}$

$$G_k^m = \omega_L^m + \alpha_L \cdot \hat{t}^m + \beta_L \cdot \hat{t}_k^m + \gamma_L \cdot \check{t}_k^m + \varphi_L \cdot \hat{c}^m + \mu_L \cdot \hat{c}_k^m + \eta_L \cdot \check{c}_k^m + \hat{S}_L(\hat{T}^m - \hat{t}_k^m - \hat{\theta}^k). \quad (2)$$

Аналогично для каждого пассажира $k \in \check{L}$

$$G_k^m = \omega_L^m + \alpha_L \cdot \check{t}^m + \beta_L \cdot \hat{t}_k^m + \gamma_L \cdot \check{t}_k^m + \varphi_L \cdot \hat{c}^m + \mu_L \cdot \hat{c}_k^m + \eta_L \cdot \check{c}_k^m + \check{S}_L(\check{T}^m + \check{t}_k^m - \check{\theta}^k). \quad (3)$$

Этап III. Обобщенная стоимость для слоя спроса с разбиением городов отправления и прибытия на районы

Город отправления и город прибытия разобьем на районы. Пусть \hat{R} – множество районов города отправления, а \check{R} – множество районов города прибытия. Будем предполагать, что для всех точек отправления и прибытия внутри одного района величины \hat{t}_k^m , \check{t}_k^m , \hat{c}_k^m , \check{c}_k^m являются постоянными, т.е. для каждого индивида k , отправляющегося из района $r \in \hat{R}$, будет

$$\hat{t}_k^m = \hat{t}_r^m \text{ и } \hat{c}_k^m = \hat{c}_r^m.$$

Аналогично для каждого индивида k , прибывающего в район $r \in \check{R}$, будет

$$\check{t}_k^m = \check{t}_r^m \text{ и } \check{c}_k^m = \check{c}_r^m.$$

Также будем предполагать, что все слои (и полуслои) одинаковым образом распределяются по районам города – пропорционально какой-то характеристике района, например, численности населения, количеству рабочих мест и т.п. Пусть для всех $r \in \hat{R}$ задана характеристика $\hat{\rho}(r)$, а для всех $r \in \check{R}$ пусть задана характеристика $\check{\rho}(r)$. Будем использовать следующие обозначения:

$\hat{L}_{\hat{r}\check{r}}$ – множество пассажиров из полуслоя спроса \hat{L} , которые отправляются из района \hat{r} города отправления в район \check{r} города прибытия;

$\check{L}_{\hat{r}\check{r}}$ – множество пассажиров из полуслоя спроса \check{L} , которые отправляются из района \hat{r} города отправления в район \check{r} города прибытия.

Таким образом, для каждого пассажира $k \in \hat{L}_{\hat{r}\check{r}}$

$$G_k^m = \omega_L^m + \alpha_L \cdot \hat{t}^m + \beta_L \cdot \hat{t}_{\hat{r}}^m + \gamma_L \cdot \check{t}_{\check{r}}^m + \varphi_L \cdot \hat{c}^m + \mu_L \cdot \hat{c}_{\hat{r}}^m + \eta_L \cdot \check{c}_{\check{r}}^m + \hat{S}_L(\hat{T}^m - \hat{t}_{\hat{r}}^m - \hat{\theta}^k). \quad (4)$$

Аналогично для каждого пассажира $k \in \check{L}_{\hat{r}\check{r}}$

$$G_k^m = \omega_L^m + \alpha_L \cdot \tilde{t}^m + \beta_L \cdot \hat{t}_{\hat{r}}^m + \gamma_L \cdot \check{t}_{\check{r}}^m + \varphi_L \cdot \tilde{c}^m + \mu_L \cdot \hat{c}_{\hat{r}}^m + \eta_L \cdot \check{c}_{\check{r}}^m + \check{S}_L(\tilde{T}^m + \check{t}_{\check{r}}^m - \check{\theta}^k). \quad (5)$$

Этап IV. Обобщенная стоимость для слоя спроса с учетом внутригородских районов и распределения наилучшего времени отправления (прибытия)

Введем обозначения:

$$\begin{aligned} \tilde{L}(\theta) &= \{k \in \tilde{L} \mid \hat{\theta}^k = \theta\}; \\ \check{L}(\theta) &= \{k \in \check{L} \mid \check{\theta}^k = \theta\}; \\ \tilde{L}_{\hat{r}\check{r}}(\theta) &= \{k \in \tilde{L}_{\hat{r}\check{r}} \mid \hat{\theta}^k = \theta\}; \\ \check{L}_{\hat{r}\check{r}}(\theta) &= \{k \in \check{L}_{\hat{r}\check{r}} \mid \check{\theta}^k = \theta\}. \end{aligned}$$

Очевидно, что в каждом из случаев $k \in \tilde{L}_{\hat{r}\check{r}}(\theta)$ и $k \in \check{L}_{\hat{r}\check{r}}(\theta)$ обобщенная стоимость поездки G_k^m не зависит от k , но зависит от районов отправления и прибытия \hat{r} и \check{r} , а также от θ (и, естественно, от слоя L). Поэтому далее обобщенную стоимость поездки для пассажиров из $\tilde{L}_{\hat{r}\check{r}}(\theta)$ будем обозначать как

$$\begin{aligned} \hat{G}^m(L, \hat{r}, \check{r}, \theta) &= \omega_L^m + \alpha_L \cdot \tilde{t}^m + \beta_L \cdot \hat{t}_{\hat{r}}^m + \gamma_L \cdot \check{t}_{\check{r}}^m + \\ &+ \varphi_L \cdot \tilde{c}^m + \mu_L \cdot \hat{c}_{\hat{r}}^m + \eta_L \cdot \check{c}_{\check{r}}^m + \hat{S}_L(\tilde{T}^m - \hat{t}_{\hat{r}}^m - \theta), \end{aligned} \quad (6)$$

а для пассажиров из $\check{L}_{\hat{r}\check{r}}(\theta)$ как

$$\begin{aligned} \check{G}^m(L, \hat{r}, \check{r}, \theta) &= \omega_L^m + \alpha_L \cdot \tilde{t}^m + \beta_L \cdot \hat{t}_{\hat{r}}^m + \gamma_L \cdot \check{t}_{\check{r}}^m + \\ &+ \varphi_L \cdot \tilde{c}^m + \mu_L \cdot \hat{c}_{\hat{r}}^m + \eta_L \cdot \check{c}_{\check{r}}^m + \check{S}_L(\tilde{T}^m + \check{t}_{\check{r}}^m - \theta). \end{aligned} \quad (7)$$

Расщепление пассажиропотока между двумя городами

Пусть M – множество всех рейсов всех видов транспорта общего пользования между городами $\hat{\Gamma}$ и $\check{\Gamma}$. Будем предполагать, что расщепление пассажиропотока по рейсам различных видов транспорта происходит согласно логистической регрессии. То есть вероятность того, что индивид k выберет рейс m , равна

$$Prob(m) = \frac{e^{-\lambda \cdot G_k^m}}{\sum_{j \in M} e^{-\lambda \cdot G_k^j}}.$$

Значит, вероятность того, что индивидуум $k \in \tilde{L}_{\hat{r}\check{r}}(\theta)$ выберет рейс m , равна

$$Prob(m) = \frac{e^{-\lambda \cdot \hat{G}^m(L, \hat{r}, \check{r}, \theta)}}{\sum_{j \in M} e^{-\lambda \cdot \hat{G}^j(L, \hat{r}, \check{r}, \theta)}}, \quad (8)$$

и аналогично вероятность того, что индивидуум $k \in \check{L}_{\hat{r}\check{r}}(\theta)$ выберет рейс m , равна

$$Prob(m) = \frac{e^{-\lambda \cdot \check{G}^m(L, \hat{r}, \check{r}, \theta)}}{\sum_{j \in M} e^{-\lambda \cdot \check{G}^j(L, \hat{r}, \check{r}, \theta)}}. \quad (9)$$

С учетом сформулированного выше предположения количество пассажиров в $\tilde{L}_{\hat{r}\check{r}}(\theta)$ равно

$$|\tilde{L}_{\hat{r}\check{r}}(\theta)| = |\tilde{L}(\theta)| \cdot \frac{\hat{p}(\hat{r})}{\sum_{r \in \hat{R}} \hat{p}(r)} \cdot \frac{\check{p}(\check{r})}{\sum_{r \in \check{R}} \check{p}(r)}. \quad (10)$$

Аналогично, количество пассажиров в $\check{L}_{\hat{r}\check{r}}(\theta)$ равно

$$|\tilde{L}_{\hat{r}\check{r}}(\theta)| = |\tilde{L}(\theta)| \cdot \frac{\hat{\rho}(\hat{r})}{\sum_{r \in \hat{R}} \hat{\rho}(r)} \cdot \frac{\check{\rho}(\check{r})}{\sum_{r \in \check{R}} \check{\rho}(r)}. \quad (11)$$

Здесь и далее через $|X|$ обозначаем количество элементов множества X .

Из (8) – (11) следует, что количество пассажиров из $\hat{L}_{\hat{r}\check{r}}(\theta)$, которые выбирают рейс m , равно

$$|\hat{L}_{\hat{r}\check{r}}^m(\theta)| = |\hat{L}(\theta)| \cdot \frac{\hat{\rho}(\hat{r})}{\sum_{r \in \hat{R}} \hat{\rho}(r)} \cdot \frac{\check{\rho}(\check{r})}{\sum_{r \in \check{R}} \check{\rho}(r)} \cdot \frac{e^{-\lambda \cdot \tilde{G}^m(L, \hat{r}, \check{r}, \theta)}}{\sum_{j \in M} e^{-\lambda \cdot \tilde{G}^j(L, \hat{r}, \check{r}, \theta)}}, \quad (12)$$

а количество пассажиров из $\tilde{L}_{\hat{r}\check{r}}(\theta)$, которые выбирают рейс m , равно

$$|\tilde{L}_{\hat{r}\check{r}}^m(\theta)| = |\tilde{L}(\theta)| \cdot \frac{\hat{\rho}(\hat{r})}{\sum_{r \in \hat{R}} \hat{\rho}(r)} \cdot \frac{\check{\rho}(\check{r})}{\sum_{r \in \check{R}} \check{\rho}(r)} \cdot \frac{e^{-\lambda \cdot \tilde{G}^m(L, \hat{r}, \check{r}, \theta)}}{\sum_{j \in M} e^{-\lambda \cdot \tilde{G}^j(L, \hat{r}, \check{r}, \theta)}}. \quad (13)$$

Пусть P_m – множество пассажиров из $\hat{\Gamma}$ в $\check{\Gamma}$, которые выбрали рейс m , тогда

$$|P_m| = |P_m(\hat{\Gamma}, \check{\Gamma})| = \sum_{L \in \Omega} \sum_{\hat{r} \in \hat{R}} \sum_{\check{r} \in \check{R}} \int_0^{24} (|\hat{L}_{\hat{r}\check{r}}^m(\theta)| + |\tilde{L}_{\hat{r}\check{r}}^m(\theta)|) d\theta. \quad (14)$$

Формула (14) содержит интегрирование по параметру θ , поскольку с теоретической точки зрения наиболее подходящий момент прибытия (отправления) θ может быть любым. Однако при практической реализации предлагаемого подхода данные о значениях величин $\hat{L}_{\hat{r}\check{r}}^m(\theta)$ и $\tilde{L}_{\hat{r}\check{r}}^m(\theta)$ для разных θ могут быть получены только лишь на основании опросов пассажиров. Например, может быть задан вопрос: «В какое время вам наиболее удобно отправляться/прибывать?». Как правило, никто не будет давать ответ на такой вопрос с точностью до секунд. Более того, обычно опрашиваемые отвечают на такой вопрос с точностью до 5, 10 или 30 мин. Поэтому будут являться конечными следующие множества:

$\hat{\Theta}$ – множество всех возможных значений наиболее подходящего момента отправления;

$\check{\Theta}$ – множество всех возможных значений наиболее подходящего момента прибытия.

Для удобства можем считать, что $\hat{\Theta} = \check{\Theta} = \Theta$ и это множество состоит из всех моментов времени от начала суток до конца с шагом 5 мин, а если какой-то из этих моментов не будет наиболее подходящим для отправления (прибытия) ни для одного пассажира, то это означает, что

$$\hat{L}_{\hat{r}\check{r}}^m(\theta) = \emptyset \quad (\tilde{L}_{\hat{r}\check{r}}^m(\theta) = \emptyset).$$

Тогда формулу (14) можно переписать в дискретной форме:

$$|P_m(\hat{\Gamma}, \check{\Gamma})| = \sum_{L \in \Omega} \sum_{\hat{r} \in \hat{R}} \sum_{\check{r} \in \check{R}} \left(\sum_{\theta \in \Theta} |\hat{L}_{\hat{r}\check{r}}^m(\theta)| + \sum_{\theta \in \Theta} |\tilde{L}_{\hat{r}\check{r}}^m(\theta)| \right). \quad (15)$$

Обозначим через B_m максимальную вместимость пассажиров для рейса $m \in M$.

Может оказаться так, что

$$|P_m(\hat{\Gamma}, \check{\Gamma})| > B_m. \quad (16)$$

Естественно, в этом случае на рейсе m отправится B_m пассажиров. А $(|P_m(\hat{\Gamma}, \check{\Gamma})| - B_m)$ пассажиров нужно «распределить» по другим рейсам.

Итак, пусть после применения формулы (15) для некоторых рейсов оказалось выполненным условие (16). Обозначим множество всех таких рейсов через M_B . Количество пассажиров на этих рейсах будет

$$\sum_{m \in M_B} B_m. \quad (17)$$

Соответственно на остальных рейсах будет

$$|P| - \sum_{m \in M_B} B_m. \quad (18)$$

Этих пассажиров нужно снова «распределить» по рейсам на основе формул (12), (13), (15). Доля этих пассажиров равна

$$Z = \frac{|P| - \sum_{m \in M_B} B_m}{|P|}, \quad (19)$$

и, предполагая, что такие пассажиры пропорционально «рассредоточены» по слоям спроса, получаем для $m \in M/M_B$

$$|\hat{L}_{\hat{r}\check{r}}^{m, new}(\theta)| = Z \cdot |\hat{L}(\theta)| \cdot \frac{\hat{\rho}(\hat{r})}{\sum_{r \in \hat{R}} \hat{\rho}(r)} \cdot \frac{\check{\rho}(\check{r})}{\sum_{r \in \check{R}} \check{\rho}(r)} \cdot \frac{e^{-\lambda \cdot \hat{G}^m(L, \hat{r}, \check{r}, \theta)}}{\sum_{j \in M/M_B} e^{-\lambda \cdot \check{G}^j(L, \hat{r}, \check{r}, \theta)}}, \quad (20)$$

$$|\check{L}_{\hat{r}\check{r}}^{m, new}(\theta)| = Z \cdot |\check{L}(\theta)| \cdot \frac{\hat{\rho}(\hat{r})}{\sum_{r \in \hat{R}} \hat{\rho}(r)} \cdot \frac{\check{\rho}(\check{r})}{\sum_{r \in \check{R}} \check{\rho}(r)} \cdot \frac{e^{-\lambda \cdot \check{G}^m(L, \hat{r}, \check{r}, \theta)}}{\sum_{j \in M/M_B} e^{-\lambda \cdot \hat{G}^j(L, \hat{r}, \check{r}, \theta)}}. \quad (21)$$

Соответственно для $m \in M/M_B$

$$|P_m^{new}(\hat{\Gamma}, \check{\Gamma})| = \sum_{L \in \Omega} \sum_{\hat{r} \in \hat{R}} \sum_{\check{r} \in \check{R}} \left(\sum_{\theta \in \Theta} |\hat{L}_{\hat{r}\check{r}}^{m, new}(\theta)| + \sum_{\theta \in \Theta} |\check{L}_{\hat{r}\check{r}}^{m, new}(\theta)| \right). \quad (22)$$

Таким образом, окончательно получаем

$$|P_m(\hat{\Gamma}, \check{\Gamma})| = \begin{cases} B_m & \text{при } m \in M_B, \\ |P_m^{new}(\hat{\Gamma}, \check{\Gamma})| & \text{при } M/M_B. \end{cases} \quad (23)$$

Возможные подходы к калибровке модели

Калибровка предложенной модели заключается в определении параметров

$$\lambda \omega_L^m, \lambda \alpha_L, \lambda \beta_L, \lambda \gamma_L, \lambda \varphi_L, \lambda \mu_L, \lambda \eta_L, \lambda \hat{S}_L(\cdot), \lambda \check{S}_L(\cdot) \quad (24)$$

по наблюдаемым входным данным (для каждого слоя спроса) и пассажиропотокам на разных рейсах всех видов транспорта общего пользования. Основная сложность здесь заключается в недоступности значительной части необходимых для этого данных. Например, недоступны для использования данные по объемам автобусных перевозок (такие данные есть только непосредственно у самих перевозчиков, а они, как правило, крайне неохотно дают к ним доступ). Кроме того, сами по себе такие данные малополезны для калибровки модели, поскольку они не содержат информацию о разбиении пассажиропотока на слои спроса.

Рассмотрим более подробно необходимые для калибровки данные и возможные источники их получения. Часть исходных данных определяется экспертным путем на основе доступной картографической информации и социально-экономической статистики. В частности, это касается разбиения на районы \hat{R} , \check{R} и определения их характеристик $\hat{\rho}(\cdot)$, $\check{\rho}(\cdot)$.

Рассматриваемые населенные пункты необходимо разбивать на транспортные районы \hat{R} , \check{R} , размер и количество которых зависят от размеров городов и численности населения. При задании границ рекомендуется следовать определенным принципам:

- использование линий естественных и искусственных преград (реки, линии железных дорог и т.д.);
- согласование с административным делением территории;
- учет функционального зонирования территории города;
- сохранение сложившихся кварталов застройки;
- недопущение районов вытянутой конфигурации [16];
- учет границ муниципальных районов, городских и сельских поселений [17].

В качестве исходных данных наиболее удобно использовать информацию, предоставляемую проектом OpenStreetMap, поскольку там помимо графа улично-дорожной сети можно получить детализиро-

важное представление о расположении зданий с учетом типа землепользования, разделения на административные районы, а также определить точки интереса (вузы, торговые центры, медицинские учреждения и пр.). Это позволяет более точно определить значения характеристик $\hat{\rho}(\cdot)$, $\check{\rho}(\cdot)$ по районам [18].

Также в модели используются внешние параметры

$$\hat{T}^m, \hat{t}_r^m, \check{T}^m, \check{t}_r^m, \hat{c}_r^m, \check{c}_r^m, \hat{c}^m, \check{c}^m, B_m. \quad (25)$$

Значения параметров (25) можно получить из открытых источников. Но это является достаточно сложной задачей, так как необходимая информация разрознена и не структурирована. Параметры $\hat{T}^m, \check{T}^m, \hat{t}_r^m, \check{t}_r^m, \hat{c}_r^m, \check{c}_r^m, \hat{c}^m, \check{c}^m, B_m$ можно определить в соответствии с расписанием каждого рейса каждого вида транспорта, но при создании транспортной модели региона вручную проделать такую работу в приемлемые сроки невозможно. Для этого необходимы разработка и программная реализация алгоритмов по сбору, очистке, объединению и агрегации данных.

Пассажирские железнодорожные перевозки в РФ осуществляют 24 пригородные пассажирские компании, представленные в 66 регионах страны. Актуальную информацию о расписании и стоимости перевозок можно узнать на их официальных сайтах (система автоматизации сбора таких данных разработана авторами [19]).

Параметры автобусного сообщения можно получить на официальных сайтах автовокзалов (хотя в сети, как правило, представлены автовокзалы только крупных населенных пунктов) или, что более предпочтительно, в сервисах по online-покупке билетов, таких как Tutu.ru. Для автоматизированного сбора подобной информации (нитки графика, стоимость, модель транспортного средства, вместимость транспортного средства и т.п.) авторами разработана система сбора данных [20].

Помимо традиционных видов транспорта популярность на рынке завоёвывают сервисы карпулинга, в частности BlaBlaCar. Естественно, это явление необходимо учитывать при разработке современных транспортных моделей [21, 22]. Так как бизнес-модель сервисов не предполагает жесткого расписания, а перевозчиками выступают владельцы личного автотранспорта, параметры $\hat{T}^m, \check{T}^m, \hat{t}_r^m, \check{t}_r^m, \hat{c}_r^m, \check{c}_r^m, \hat{c}^m, \check{c}^m$ можно получить в усредненном виде, собирая данные о размещаемых на сервисах карпулинга объявлениях (соответствующая система разработана авторами в [23]). При этом параметр B_m определяется в соответствии с маркой автомобиля.

Говоря о параметрах внутригородского перемещения, рассчитать $\hat{t}_r^m, \check{t}_r^m, \hat{c}_r^m, \check{c}_r^m$ наиболее предпочтительно при помощи программных алгоритмов и сервисов маршрутизации, так как для каждого района \hat{R}, \check{R} необходимо найти соответствующие значения до всех точек отправления и от всех точек прибытия межмуниципальных поездок. Что касается традиционных видов транспорта, количество расчетов в большей степени будет зависеть от количества районов, так как объектов инфраструктуры межмуниципального транспорта общего пользования не так много (автовокзалы и железнодорожные станции). При интеграции в транспортную модель карпулинговых поездок количество расчетов возрастает, вследствие того, что любая точка в пространстве может послужить точкой отправления/прибытия для таких поездок.

Наиболее труднодоступной является информация о полуслоях спроса $\hat{L}(\theta), \check{L}(\theta)$ и их расщеплении по разным видам транспорта. Для ее получения может быть использован метод опроса, поскольку для калибровки модели расщепления нет необходимости иметь данные о величине пассажиропотоков, достаточно знать их доли в общем пассажиропотоке, которые можно определить на основании репрезентативной выборки. Для этого необходимо провести опрос на всей территории, для которой формируется транспортная модель. Соответственно необходима организация социологического исследования во множестве населенных пунктов. В настоящее время можно снизить издержки за счет размещения ссылок на онлайн-опросы в социальных сетях.

Основная информация, которую необходимо получить:

- пространственное распределение спроса;
- подвижность населения;
- предпочтительный вид транспорта;
- предпочтительное время отправления/прибытия.

Калибровку модели на основе описанных выше данных можно осуществить с помощью метода наименьших квадратов.

Выводы

Предложенная модель формирования обобщенной стоимости индивидуальной межмуниципальной поездки направлена на более точное моделирование поведения населения при выборе вида транспорта за счет учета затрат на внутригородское перемещение, а также предпочтительного времени отправления и прибытия. Модель является достаточно гибкой и допускает различные модификации. В частности, использование логистической регрессии для расщепления пассажиропотоков по видам транспорта не является принципиальным, ее можно заменить на любую другую модель дискретного выбора.

Моделирование влияния предпочтительного времени отправления и прибытия сводится к рассмотрению однопараметрического семейства унимодальных функций затрат с дискретным множеством значений параметра Θ .

Также важно отметить, что калибровка параметров модели является сложной задачей, требующей комплексного подхода. Необходима организация социологических опросов для определения транспортного поведения населения, разработка алгоритмов автоматизированного сбора данных о межмуниципальных поездках из открытых источников, а также программная реализация некоторых расчетов для определения параметров внутригородского перемещения.

В настоящее время авторами разработаны алгоритмы сбора информации о межмуниципальных поездках. Планируется организация социологических опросов в Свердловской области для определения калибровочных коэффициентов и формирования синтетической популяции на основе репрезентативной выборки. В дальнейшем будет произведена апробация предложенного подхода при создании транспортной модели для оптимизации расписания межмуниципального общественного транспорта.

Список литературы

1 **Ortuzar, J. D.** Modelling Transport / J. D. Ortuzar, L. G. Willumsen // Chichester : John Wiley & Sons Ltd, 2011. – 606 p. – ISBN 9780470760390.

2 **Reis, V.** Rail and multi-modal transport / V. Reis // Research in Transportation Economics. – 2013. – Vol. 41. – No. 1. – P. 17–30. – DOI 10.1016/j.retrec.2012.10.005.

3 **Barus, L. S.** Intercity mode choice modelling : considering the intracity transport systems with application to the Jakarta-Bandung corridor / L. S. Barus // International Journal of Technology. – 2016. – Vol. 7. – No. 4. – P. 581–591. – DOI 10.14716/ijtech.v7i4.2798.

4 Введение в математическое моделирование транспортных потоков : учебное пособие / А. В. Гасников [и др.] ; под редакцией А. В. Гасникова. – Издание 2-е, испр. и доп. – Москва : МЦНМО, 2013 г. – ISBN 978-5-4439-0040-7.

5 **Швецов, В. И.** Математическое моделирование загрузки транспортных сетей / В. И. Швецов, А. С. Алиев. – Москва : URSS, 2003. – 64 с. – ISBN 5-354-00385-7.

6 **Abdulaal, M.** Methods for combining modal split and equilibrium assignment models / M. Abdulaal, L. J. LeBlanc // Transportation Science. – 1979. – Vol. 13. – No. 4. – P. 292–314. – DOI 10.1287/trsc.13.4.292.

7 **Тимофеева, Г. А.** Применение синтетической гравитационной модели с показательно-

References

1 **Ortuzar, J. D.** Modelling Transport / J. D. Ortuzar, L. G. Willumsen // Chichester : John Wiley & Sons Ltd, 2011. – 606 p. – ISBN 9780470760390.

2 **Reis, V.** Rail and multi-modal transport / V. Reis // Research in Transportation Economics. – 2013. – Vol. 41. – No. 1. – P. 17–30. – DOI 10.1016/j.retrec.2012.10.005.

3 **Barus, L. S.** Intercity mode choice modelling : considering the intracity transport systems with application to the Jakarta-Bandung corridor / L. S. barus // International Journal of Technology. – 2016. – Vol. 7. – No. 4. – P. 581–591. – DOI 10.14716/ijtech.v7i4.2798.

4 Introduction to Mathematical Modelling of Transport Flows : Textbook / A. V. Gasnikov [et al.] ; Edited by A. V. Gasnikov. – Edition 2nd revised and supplemented by. – Moscow : ICNMO, 2013. – ISBN 978-5-4439-0040-7.

5 **Shvetsov, V. I.** Mathematical modelling of loading of transport networks / V. I. Shvetsov, A. S. Aliev // Moscow : URSS, 2003. – 64 p. – ISBN 5-354-00385-7.

6 **Abdulaal, M.** Methods for combining modal split and equilibrium assignment models / M. Abdulaal, L. J. LeBlanc // Transportation Science. – 1979. – Vol. 13. – No. 4. – P. 292–314. – DOI 10.1287/trsc.13.4.292.

7 **Timofeeva, G. A.** Application of synthetic gravity model with indicative-degree gravity function

степенной функцией тяготения для расчета расщепления пассажиропотока по разным видам общественного транспорта / Г. А. Тимофеева, О. Н. Ие // Транспорт Урала. – 2020. – № 4. – 67 с. – DOI 10.20291/1815-9400-2020-4-3-9.

8 **Тимофеева, Г. А.** Моделирование расщепления пассажиропотока по видам транспорта методом взвешенных групповых оценок / Г. А. Тимофеева, А. Д. Хазимуллин // Транспорт Урала. – 2022. – № 2. – С. 3–8. – DOI 10.20291/1815-9400-2022-2-3-8.

9 **Santos, G.** Factors influencing modal split of commuting journeys in medium-size European cities / G. Santos // Journal of Transport Geography. – 2013. – Vol. 30. – P. 127–137. – DOI 10.1016/j.jtrangeo.2013.04.005.

10 **Thorhauge, M.** Departure time choice : Modelling individual preferences, intention and constraints / M. Thorhauge, J. Rich, E. Cherchi // Department of Transport. – 2015. – 147 p.

11 **Small, K. A.** The scheduling of consumer activities : work trips / K. A. Small // The American Economic Review. – 1982. – Vol. 72. – No. 3. – P. 467–479.

12 **Vickrey, W. S.** Congestion theory and transport investment / W. S. Vickrey // The American Economic Review. – 1969. – P. 251–260.

13 **Cosslett, S.** The trip timing decision for travel to work by automobile / S. Cosslett // Demand Model Estimation and Validation, The Urban Travel Demand Forecasting Project, McFadden, D. – 1977. – P. 201–221.

14 **Cascetta, E.** Assessment of schedule-based and frequency-based assignment models for strategic and operational planning of high-speed rail services / E. Cascetta, P. Coppola // Transportation Research Part A : Policy and Practice. – 2016. – Vol. 84. – P. 93–108. – DOI 10.1016/j.tra.2015.09.010.

15 **Cascetta, E.** Transportation systems analysis : models and applications / E. Cascetta // Springer Science & Business Media. – 2009. – Vol. 29. – ISSN 1931-6828.

16 Методические рекомендации по использованию программных продуктов математического моделирования транспортных потоков при оценке эффективности проектных решений в сфере организации дорожного движения. – Москва : Министерство транспорта Российской Федерации, 2017. – 72 с.

17 **Якимов, М. Р.** Транспортное планирование : практические рекомендации по созданию транспортных моделей городов в программном комплексе PTV Vision@ VISUM : монография. / М. Р. Якимов, Ю. А. Попов. – 2-е изд., перераб. и

for calculation of passenger flow splitting by different types of public transport / G. A. Timofeeva, O. N. Ie // Transport of the Urals. – 2020. – No. 4. – P. 67. – DOI 10.20291/1815-9400-2020-4-3-9.

8 **Timofeeva, G. A.** Modelling of passenger flow splitting by types of transport by the method of weighted group estimates / G. A. Timofeeva, A. D. Hazimullin // Transport of the Urals. – 2022. – No. 2. – P. 3–8. – DOI 10.20291/1815-9400-2022-2-3-8.

9 **Santos, G.** Factors influencing modal split of commuting journeys in medium-size European cities / G. Santos // Journal of Transport Geography. – 2013. – Vol. 30. – P. 127–137. – DOI 10.1016/j.jtrangeo.2013.04.005.

10 **Thorhauge, M.** Departure time choice : Modelling individual preferences, intention and constraints / M. Thorhauge, J. Rich, E. Cherchi // Department of Transport. – 2015. – 147 p.

11 **Small, K. A.** The scheduling of consumer activities : work trips / K. A. Small // The American Economic Review. – 1982. – Vol. 72. – No. 3. – P. 467–479.

12 **Vickrey, W. S.** Congestion theory and transport investment / W. S. Vickrey // The American Economic Review. – 1969. – P. 251–260.

13 **Cosslett, S.** The trip timing decision for travel to work by automobile / S. Cosslett // Demand Model Estimation and Validation, The Urban Travel Demand Forecasting Project, McFadden, D. – 1977. – P. 201–221.

14 **Cascetta, E.** Assessment of schedule-based and frequency-based assignment models for strategic and operational planning of high-speed rail services / E. Cascetta, P. Coppola // Transportation Research Part A : Policy and Practice. – 2016. – Vol. 84. – P. 93–108. – DOI 10.1016/j.tra.2015.09.010.

15 **Cascetta, E.** Transportation systems analysis : models and applications / E. Cascetta // Springer Science & Business Media. – 2009. – Vol. 29. – ISSN 1931-6828.

16 Methodical Recommendations on the Use of Software Products of Mathematical Modelling of Traffic Flows in the Evaluation of the Effectiveness of Design Solutions in the Sphere of Traffic Management. – Moscow : Ministry of Transport of the Russian Federation, 2017. – 72 p.

17 **Yakimov, M. R.** Transport planning : practical recommendations for the creation of urban transport models in the software package PTV Vision@ VISUM : monograph. / M. R. Yakimov, Yu. A. Popov. – 2nd ed., rev. and supplement. –

доп. – Москва : Проспект, 2022. – 176 с. – ISBN 978-5-392-35972-1.

18 **Якимов, М. Р.** Транспортное планирование : создание транспортных моделей городов : монография / М. Р. Якимов. – Москва : Логос, 2013. – 188 с. – ISBN 978-5-98704-729-3.

19 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023619563 Российская Федерация. Автоматизированная система сбора и обработки информации о расписании пригородных электропоездов : № 2023618697 : заявл. 03.05.2023 : опубл. 12.05.2023 / К. К. Ваколюк, А. В. Мартыненко. – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ.

20 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023619562 Российская Федерация. Автоматизированная система сбора и обработки информации о межмуниципальном автобусном сообщении : № 2023618696 : заявл. 03.05.2023 : опубл. 12.05.2023 / К. К. Ваколюк, А. В. Мартыненко. – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ.

21 **Мартыненко, А. В.** Влияние сервиса BlaBlaCar на междугородные пассажирские перевозки в Свердловской области / А. В. Мартыненко, К. К. Ваколюк // Железнодорожный транспорт и технологии. – 2023. – С. 224–226. – ISBN 978-5-94614-528-2.

22 **Martynenko, A.** Analysis of the Regional Carpooling Market (Case Study of the Sverdlovsk Region) / A. Martynenko, K. Vakolyuk // Transportation Research Procedia. – 2023. – Vol. 68. – P. 785–791. – DOI 10.1016/j.trpro.2023.02.109.

23 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 20233619564 Российская Федерация. Автоматизированная система сбора и обработки информации о предложениях рынка карпулинга : № 2023618698 : заявл. 03.05.2023 : опубл. 12.05.2023 / К. К. Ваколюк, А. В. Мартыненко. – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ.

Moscow : Prospect, 2022. – 176 с. – ISBN 978-5-392-35972-1.

18 **Yakimov, M. R.** Transport planning : creation of transport models of cities : monograph / M. R. Yakimov. – Moscow : Logos, 2013. – 188 p. – ISBN 978-5-98704-729-3.

19 Certificate of State Registration of Computer Programme No. 2023619563 Russian Federation. Automated system of collection and processing of information about the schedule of suburban electric trains / K. K. Vakolyuk, A. V. Martynenko. – No. 2023618697 ; filed. 03.04.2023, publ. 12.04.2023. – Registered in the Register of Computer Programs.

20 Certificate of state registration of computer programme No. 2023619562 Russian Federation. Automated system of collection and processing of information about intermunicipal bus service / K. K. Vakolyuk, A. V. Martynenko. – No. 2023618696 ; filed. 03.04.2023, publ. 12.04.2023. – Registered in the Register of Computer Programs.

21 **Martynenko, A. V.** Influence of BlaBlaCar service on intercity passenger transportations in the Sverdlovsk region / A. V. Martynenko, K. K. Vakolyuk // Railway Transport and Technology. – 2023. – P. 224–226. – ISBN 978-5-94614-528-2.

22 **Martynenko, A.** Analysis of the Regional Carpooling Market (Case Study of the Sverdlovsk Region) / A. Martynenko, K. Vakolyuk // Transportation Research Procedia. – 2023. – Vol. 68. – P. 785–791. – DOI 10.1016/j.trpro.2023.02.109.

23 Certificate of state registration of computer programme No. 20233619564 Russian Federation. Automated system of collection and processing of information about carpooling market offers / K. K. Vakolyuk, A. V. Martynenko. – No. 2023618698 ; avt. 03.04.2023, publ. 12.04.2023 – Registered in the Register of Computer Programs.

A. V. Martynenko, K. K. Vakolyuk

MODELLING OF THE INTERCITY PASSENGER TRAFFIC DIVISION WITH CONSIDERATION OF TIMETABLE AND COSTS FOR INTRACITY MOVEMENTS

Abstract. This paper proposes a model to estimate the generalised cost of individual inter-municipal trips. The model integrates various aspects, including intra-city travel costs and passengers' preferences for departure and arrival times. This approach allows for a more accurate determination of passengers' choice of transport mode, route and trip. The model is flexible and can be modified and used within a traditional four-step transport demand forecasting model. The paper also outlines methods for determining calibration parameters, including analysis of input data obtained from sociological surveys and open sources, which allows for detailed calculation of parameters related to intra-city movements.

Keywords: passenger flow splitting model, preferred time of departure and arrival, transport demand, inter-municipal passenger flows.

For citation: Martynenko, A. V. Modelling of the intercity passenger traffic division with consideration of timetable and costs for intracity movements / A. V. Martynenko, K. K. Vakolyuk // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 2. – P. 143–155. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_143.

Сведения об авторах

Мартыненко Александр Валериевич

Уральский государственный университет
путей сообщения (УрГУПС),
кафедра «Естественнонаучные дисциплины»,
кандидат физико-математических наук,
доцент.

Институт экономики Уральского отделения
Российской академии наук (ИЭ УрО РАН),
Центр развития и размещения
производительных сил,
старший научный сотрудник,
e-mail: AMartynenko@usurt.ru

Ваколюк Кирилл Константинович

Уральский государственный университет
путей сообщения (УрГУПС),
кафедра «Естественнонаучные дисциплины»,
аспирант,
e-mail: kirillvakolyuk@mail.ru

Information about the authors

Martynenko Alexander Valerievich

Ural State University of Railway Transport
(USURT),
Chair «Natural Science Disciplines»,
Candidate of Physical and Mathematical
Sciences, Associate Professor.

Institute of Economics of the Ural Branch of
the Russian Academy of Sciences,
Centre for Development and Location of
Productive Forces,
Senior Researcher,
e-mail: AMartynenko@usurt.ru

Vakolyuk Kirill Konstantinovich

Ural State University of Railway Transport
(USURT),
Chair «Natural Science Disciplines»,
Postgraduate Student,
e-mail: kirillvakolyuk@mail.ru