ВЕСТНИК ПЕРМСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
2012 ЭКОНОМИКА Вып. 3(14)
УДК 338.47:656

ПРИМЕНЕНИЕ МОНИТОРИНГА ПАССАЖИРОПОТОКОВ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ОПЛАТЫ ПРОЕЗДА В ПОЕЗДАХ ПРИГОРОДНОГО СООБЩЕНИЯ

А.В. Панюков, д. физ.-мат. наук, проф., зав. кафедрой экономико-математических методов и статистики
Электронный адрес: a_panyukov@mail.ru
Т.С. Демьяненко, асп. кафедры экономико-математических методов и статистики
Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский), 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76
С.А. Губская, ст. преп. кафедры технологии транспортного производства
Электронный адрес: gsa@chirt.ru
Челябинский институт путей сообщения – филиал Уральского государственного университета путей сообщения, 454091, г. Челябинск, ул. Цвиллинга, 56, ЧИПС

Предложен способ статистической обработки результатов мониторинга пассажиропотока, заключающийся в построении функции распределения вероятностей количества пассажиров, осуществляющих проезд между всеми возможными парами станций отправления и назначения. Предложены способы планирования работы кассиров.

Ключевые слова: мониторинг пассажиропотоков; распределение вероятностей; система массового обслуживания.

Введение

Современная концепция ОАО «РЖД» уделяет большое внимание борьбе с безбилетным проездом в поездах пригородного сообщения [1]. В последнее время эта борьба усилилась. Но несмотря на применение различных средств (турникеты, ограждения) и связанные с ними дополнительные расходы регионального бюджета, так и не найдено эффективное решение этой проблемы.

В июле 2010 г. в период массовых перевозок, был осуществлён мониторинг по трем направлениям Челябинского участка железной дороги [3]. Анализировались количественные и качественные показатели пригородных перевозок, а также регулярность поездок пассажира; удовлетворенность расписанием движения электропоездов; возрастной контингент; место и удобство приобретения билета; был проведен учет пассажиров, садящихся в поезд без проездных документов.

Мониторинг пассажиропотока на Челябинском участке показал, что на всех остановочных пунктах пассажиры садятся в пригородный поезд без проездного документа. Право на льготный проезд (с учетом работников железнодорожного транспорта) имеется только у 10 % пассажиров.

Существующая система продажи билетов на вокзале и в поездах не дает возможности реального учета и контроля проезда пассажира. Пассажир может приобрести билет на одну зону, а ехать дальше. В пути следования пассажиры, садящиеся на остановочных платформах, где нет билетных касс, должны приобретать билеты у разъездного билетного кассира. В настоящее время разъездной билетный кассир – это работник аутсорсинговой компании. В пригородном поезде работает одна бригада разъездных билетных кассиров. Бригада состоит из двух человек, которые идут одновременно в одном вагоне (один по одной стороне, другой – по противоположной стороне). Это создает возможность для пассажиров, следующих в других вагонах этого пригородного поезда, проехать часть пути бесплатно.

Отношение менеджмента к пассажиру как потенциальному «зайцу» обречено на неуспех. Современный менеджмент качества предполагает научный подход, при котором организация, будучи зависимой от своих потребителей, должна понимать их текущие и будущие потребности, выполнять их требования и стремиться превзойти их ожидания [5]. Пассажиры являются потребителями услуги, предоставляемой железной дороги.

Первое впечатление о работе железнодорожного транспорта у пассажира создается при приобретении проездного документа (билета) на вокзале. Опрос показал, что пассажир затрачивает от трех до десяти минут на покупку билета в пригородной кассе. В среднем эта величина составляет 8,4 минуты, хотя в соответствии со стандартом время ожидания при покупке билета в пригородной кассе должно составлять не более семи минут. В соответствии с изложенным выше актуальной является проблема разработки и внедрения новых способов обеспечения оплаты проезда в пригородных поездах.

Одним из таких способов является сплошной мониторинг входного и выходного пассажиропотоков [2, 4] (т.е. «двойной учёт»). При входе в вагон пригородного поезда пассажиру выдаётся входная магнитная карточка с регистрацией станции входа с помощью терминала, а на выходе карточка возвращается контролёру с регистрацией станции выхода и проверкой оплаты стоимости проезда.

Автоматизированное обеспечение покупки билетов по системе «двойного учёта» позволяет удовлетворить потребности пассажиров в билетах, практически исключить потери за безбилетный проезд и негативные проявления человеческого фактора обслуживающего персонала, включая аутсорсинг. При осуществлении данного способа имеется возможность регистрации входного и выходного пассажиропотоков в общей базе данных с целью дальнейшей статистической обработки для объективного планирования как расписаний движения, так и работы кассиров [6].

В работе предложен способ статистической обработки результатов мониторинга, заключающийся в построении функции распределения вероятностей количества пассажиров для каждой возможной пары (i, $j>i$) станций отправления и назначения. Предложены способы планирования работы кассиров.

Математическая модель пассажиропотоков. Общая схема пассажиропотоков на маршруте приведена на рис. 1.

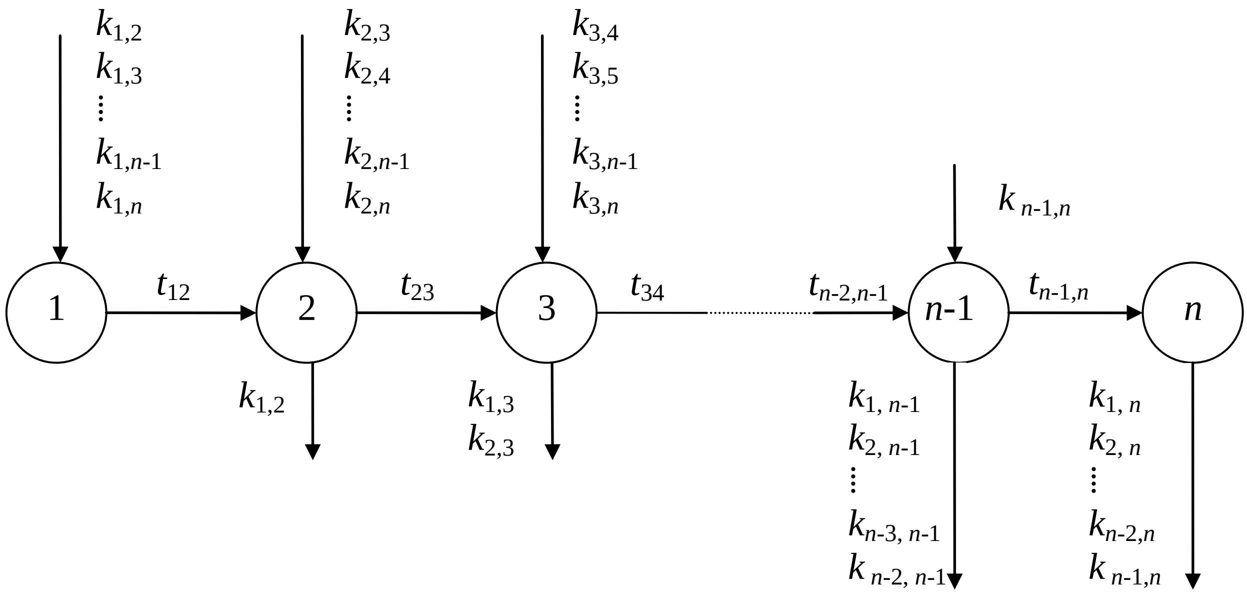

Рис. 1. Схема пассажиропотоков маршрута

Маршрут содержит станции 1,2,3…,n-1,n; время перегона между станциями i и i+1, i=1,2,3…,n-1, составляет величину $t_{i,i+1}$; количество пассажиров, осуществляющих переезд от станции отправления i=1,2,3…,n-1 до станции назначения j=2,3…,n-1, равно $K_{i,j}$.

В совокупности данные величины образуют случайный вектор $\mathbf{k}=\left\{k_{i,j}: i=1,2,3,\ldots,n-2,n-1,\ j=i+1,\ldots,n-1,n\right\}$.

Полной характеристикой случайной величины является ее функция распределения. В рассматриваемом случае ведение общей базы данных всех прецедентов маршрута позволяет сформировать множество реализаций

$$\mathbf{K}_m=\left\{\mathbf{k}^{(s)}=\left\{k_{i,j}^{(s)}: i=1,2,3,\ldots,n-2,n-1,\ j=i+1,\ldots,n-1,n\right\},\quad s=1,2,3,\ldots,m\right\}$$

и на его основе сформировать статистическую функцию распределения вероятностей значений $k_{i,j}$, т.е. определить относительную частоту появления значения $k_{i,j}$ во всей совокупности реализаций:

$$\mathrm{p}_{i,j}^{(m)}\left(k_{i,j}\right)=\frac{\sum_{s=1}^{m}\chi_{k_{i,j}}(s)}{m},\quad \chi_{k_{i,j}}(s)=\begin{cases}1, & k_{i,j}=k_{i,j}^{(s)},\\ 0, & k_{i,j}\neq k_{i,j}^{(s)}.\end{cases}$$

Для маршрутов с фиксированным днем недели и временем отправления правдоподобной представляется следующая гипотеза.

Гипотеза независимости. *Все случайные величины*

$$k_{i,j}^{(s)}:\ i=1,2,3,\ldots,n-2,n-1,\quad j=i+1,\ldots,n-1,n,\quad s=1,2,3,\ldots,m$$

являются независимыми.

Проведенное статистическое исследование пассажиропотоков на трех направлениях Челябинского участка железной дороги показало практическое отсутствие корреляции между исследуемыми величинами, что подтверждает целесообразность принятия данной гипотезы. Далее гипотеза независимости принимается.

В соответствии с теоремой Хинчина последовательности независимых случайных величин удовлетворяют закону больших чисел. Отсюда следует, что статистические функции распределения $\mathrm{p}_{i,j}^{(m)}(k)$ случайных величин $k_{i,j}$ с увеличением числа наблюдений *m* будут сходиться к фактическим функциям распределения

$$\mathrm{p}_{i,j}(k):\quad i=1,2,3,\ldots,n-2,n-1,\quad j=i+1,\ldots,n-1,n\cdot$$

Таким образом, в качестве математической модели пассажиропотока принимается функция распределения всей совокупности случайных величин $k_{i,j}$, которую в силу их независимости можно представить в виде:

$$\mathbf{p}(\mathbf{k})=\prod_{i=1}^{n-1}\prod_{j=i+1}^{n}\mathrm{p}_{i,j}\left(k_{i,j}\right).$$

Время, требуемое на оплату проезда.

Время τ, требуемое на оплату одним пассажиром своего проезда, также является случайной величиной. В классической теории массового обслуживания для времени обслуживания (аналога величины τ) принимается гипотеза об экспоненциальном распределении вероятностей. В настоящее время в связи с применением множества форм оплаты: предоплата, безналичная оплата, наличная оплата.

Далее будем предполагать, что длительность обслуживания кассиром пассажира принимает следующие значения:

$$\tau=\begin{cases}\tau_0, & \text{предоплата или безналичная оплата,}\\ \tau_1, & \text{быстрая наличная оплата,}\\ \tau_2, & \text{медленная наличная оплата,}\\ \tau_3, & \text{отказ от оплаты.}\end{cases}$$

Вероятность события $\{\tau=\tau_i\},\ i=0,1,2,3$ далее будем обозначать через q_i. В соответствии с предельными теоремами теории вероятностей время τ_k обслуживания *k* пассажиров будет иметь асимптотически нормальное распределение вероятностей с математическим ожиданием $\hat{\tau}_k=k\cdot\sum_{i=0}^{3}\left(q_i\cdot\tau_i\right)$ и дисперсией $\hat{\sigma}_k^2=k\cdot\sum_{i=0}^{3}\left(q_i\cdot\left(\hat{\tau}_k-\tau_i\right)^2\right)$, т.е. иметь функцию распределения

$$F_k(\tau)=\mathbf{P}\{\tau_k\leq\tau\}=\Phi\left(\frac{\tau-\hat{\tau}_k}{\hat{\sigma}_k}\right),$$

где $\Phi(\cdot)$ – функция стандартного нормального распределения вероятностей.

Применение результатов мониторинга пассажиропотоков.

Исследуемую систему можно отнести к системам массового обслуживания без отказов со штрафами за отклонение от директивного времени завершения обслуживания [7]. Если часть пассажиров к моменту завершения поездки окажется не обслуженными, то это приводит к штрафам за время задержки.

В ряде статей рассмотрены способы оценки систем с единственным [9] или несколькими [11] обслуживающими терминалами. Другие авторы [8, 10] изучают способы оптимального управления такими системами.

Отметим, что специфика рассматриваемой проблемы не позволяет использовать для ее анализа классические модели теории массового обслуживания.

Рассмотрим вопросы оценки качества обслуживания и планирования работы кассиров в терминах функций распределения $\mathrm{p}_{i,j}$, полученных в результате мониторинга пассажиропотоков. Исследованы три формы обслуживания:

1. *Оплата при завершении поездки*: на отрезке (j-1, j) маршрута проезд оплачивают только выходящие на остановке j=2,3,…,n пассажиры, перемещаясь после оплаты проезда в выходной накопитель.

2. *Оплата в начале поездки:* все входящие пассажиры попадают во входной накопитель, а после оплаты проезда переходят в пассажирский салон.

3. *Оплата в течение поездки*, когда пассажир может и должен быть обслужен на протяжении всей поездки.

Оплата при завершении поездки.

В соответствии с данной формой обслуживания на отрезке (j-1,j) маршрута проезд оплачивают только пассажиры, выходящие на остановке j. Число выходящих пассажиров будет равно $k_j = \sum_{i=1}^{j} k_{i,j}$, а вероятность, с которой дискретная случайная величина k_j принимает значение k, равна

$$\mathbf{P}_{k_j}(k) = \sum_{\left\{k_{i,j} \ge 0:\, i=1,2,\ldots j-1,\ \sum_{i=1}^{j} k_{i,j} = k\right\}} \left(\prod_{i=1}^{j-1} \mathrm{p}_{i,j}(k_{i,j}) \right),$$

$$k \in \mathrm{K}_j = \left[\sum_{i=1}^{j-1} \min\{k_{i,j} : p_{i,j}(k_{i,j}) > 0\}, \quad \sum_{i=1}^{j-1} \max\{k_{i,j} : p_{i,j}(k_{i,j}) > 0\} \right] \cap \mathbf{Z}$$

Функция $\mathbf{P}_{k_j}(k)$ полностью определяется функциями $\mathrm{p}_{i,j}(\square)$, т.е. результатами мониторинга, поэтому далее можно считать все значения $\mathbf{P}_{k_j}(k)$ заданными.

Для нахождения закона распределения вероятностей для значений времени T_j, необходимого для сбора оплаты за проезд на перегоне (j-1,j), воспользуемся формулой полной вероятности:

$$G_j(T) = P\{T_j \le T\} = \sum_{k \in K_j} [P_{k_j}(K) \cdot P\{\tau_k \le T\}] = \sum_{k \in K_j} \left[P_{k_j}(K) \cdot \Phi\left(\frac{T - \hat{\tau}_k}{\hat{\sigma}_k} \right) \right].$$

Отметим, что функции распределения $G_j(T)$, j=2,3,…,n строятся по результатам мониторинга и могут быть использованы для директивного планирования работы кассиров. Используя построенные функции $G_j(T)$, j=2,3,…,n, можно определить количество кассиров, необходимое для обеспечения с вероятностью β кассового сбора со всех выходящих на станции j пассажиров.

Действительно, время $T_j^{(\beta)}$, требуемое для того, чтобы на перегоне (j-1,j) с вероятностью β все выходящие пассажиры были обслужены, является β-квантилью распределения $G_j(T)$, т.е.

$$T_j^{(\beta)} = \sup\{T : \quad G_j(T) \le \beta\}.$$

Поскольку функции $G_j(T)$, j=2,3,…,n являются монотонными, то все значения $T_j^{(\beta)}$ могут быть легко вычислены, например, методом половинного деления. Отсюда следует, что количество кассиров для обеспечения с вероятностью β кассового сбора со всех выходящих на перегоне (j-1,j) пассажиров равно

$$N^{(\beta)} = \left\lceil \frac{T_j^{(\beta)}}{t_{j-1,j}} \right\rceil,$$

где $\lceil x \rceil$ – наименьшее целое число, не меньшее x.

Оплата в начале поездки.

В соответствии с данной формой обслуживания все входящие на станции i пассажиры попадают во входной накопитель, а после оплаты проезда переходят в пассажирский салон. Число входящих на станции i пассажиров равно $k_i = \sum_{j=i}^{n} k_{i,j}$, а вероятность, с которой дискретная случайная величина k_i принимает значение k, равна

$$P_{k_i}(K) = \sum_{\left\{ki,j \ge 0:\, j=i+1,i+2,\ldots n,\ \sum\limits_{j=i+1}^{n} k_{i,j} = k\right\}} \left(\prod_{j=i+1}^{n} p_{i,j}(k_{i,j}) \right),$$

$$K \in^2 K_i = \left[\sum_{j=i+1}^{n} \begin{matrix} \min\{K_{i,j} : p_{i,j}(K_{i,j}) > 0\}, \\ \sum_{j=i+1}^{n} \max\{K_{i,j} : p_{i,j}(K_{i,j}) > 0\} \end{matrix} \right] \cap Z \quad .$$

Предположим, что к началу посадки на станции i во входном накопителе осталось необслуженными r_i пассажиров, и пусть $\mathbf{q}_{r_i}(r)$ – известная вероятность, с которой дискретная случайная величина r_i принимает значение r. Тогда закон распределения для числа пассажиров s_i=r_i+k_i, находящихся в накопителе после станции i, имеет вид

$$\tilde{\mathbf{Q}}_{s_i}(s) = \mathbf{P}\{s_i = s\} = \sum_{\{k,r:\, k+r=s\}} \mathbf{p}_{k_i}(k) \mathbf{q}_{r_i}(r),$$

$$s \in S_i = \left[\begin{matrix} \min\{k_i + r_i : p_i(k_i) \cdot q_i(r_i) > 0\}, \\ \max\{k_i + r_i : p_i(k_i) \cdot q_i(r_i) > 0\} \end{matrix} \right] \cap Z \ .$$

Закон распределения вероятностей для значений времени T_i, необходимого для сбора оплаты за проезд на перегоне (i, i+1), определим, воспользовавшись формулой полной вероятности:

$$H_i(T) = P\{T_i \le T\} = \sum_{s \in S_i} \left[\tilde{Q}_{S_i}(S) \cdot P\{\tau_s \le T\} \right] = $$

$$= \sum_{s \in S_i} \left[\tilde{Q}_{S_i}(S) \cdot \Phi T\left(\frac{T - \hat{\tau}_s}{\hat{Q}_s} \right) \right].$$

Время $\left({}_2T_i^{(\beta)}\right)$, требуемое для того, чтобы на перегоне (i, i+1) с вероятностью β все находящиеся во входном накопителе пассажиры были обслужены, является β-квантилью распределения $H_i(T)$, т.е.

$$ {}_2T_i^{(\beta)} = \sup\left\{T: \quad H_i(T) \le \beta\right\}. $$

Доля обслуженных за время $t_{i,i+1}$ пассажиров равно

$$ L_i = \min\left\{1, \frac{t_{i,i+1}}{\left({}_2T_i^{(\beta)}\right)\cdot N_i}\right\}, $$

где N_i – количество кассиров на перегоне (i,i+1).

Таким образом, после перегона (i,i+1) необслуженными останутся $r_{i+1} = \left(1 - L_i\right)\cdot s_i$, причем закон распределения случайной величины r_{i+1} имеет вид

$$ \mathbf{q}_{r_{i+1}}(r) = \tilde{\mathbf{Q}}_{s_i}\left(\lfloor r\cdot(1-L_i)\rfloor\right). $$

Итак, зная закон распределения количества пассажиров r_i, оставшихся в накопителе к концу перегона (i-1, i), легко получить закон распределения количества пассажиров r_{i+1}, оставшихся в накопителе к концу перегона (i,i+1). Поскольку r_1 с вероятностью единица принимает нулевое значение, то при заданных значениях N_i, i=1,2,…,n-1 могут быть определены законы распределения всех случайных величин r_i , i=1,2,…,n-1. Значения N_i могут быть определены из решения задачи оптимизации

$$ \min_{N_i:\, i=1,2,\ldots,n-1}\left\{\sum_{i=1}^{n-1} N_i : (\forall i = 1,2,\ldots,n-1)\left(\mathbf{P}\{s_i > s_{\max}\} < \alpha\right)\right\}, $$

где $s_{\max}$ – вместимость накопителя для входящих пассажиров, α – уровень доверия.

Оплата в течение поездки.

В соответствии с данной дисциплиной обслуживания пассажир может и должен быть обслужен на протяжении всей своей поездки. Данное требование может быть формализовано следующим образом.

Количество пассажиров, которое необходимо обслужить на промежутке от станции l=1,2,…,n-1 до станции m=l+1,l+2,…,n, равно $L_{lm} = \sum_{(i,j):\, l\le i<j\le n} k_{i,j}$. Вероятность, с которой случайная величина L_{lm} примет значение L, равна

$$ P_{L_{lm}}(L) P\{L_{lm} = L\} = \sum_{\left\{K_{i,j}\ge 0:\, l\le i<j\le n,\, \sum_{(i,j):\, i\le i<j\le n} k_{i,j} = L\right\}} \left(\prod_{(i,j):\, l\le i<j\le n} p_{i,j}\left(K_{i,j}\right)\right). $$

Для нахождения закона распределения вероятностей для значений времени T_{lm}, необходимого для обслуживания пассажиров на промежутке от станции l=1,2,…,n-1 до станции m=l+1,l+2,…,n, воспользуемся формулой полной вероятности:

$$ G_{lm}(T) = P\{T_{lm} \le T\} = \sum_{L:\, P_{lm}(L)>0}\left[P_{L_{lm}}(L)\cdot P\{\tau_L \le T\}\right] = $$

$$ = \sum_{L:\, P_{L_{lm}}(L)>0}\left[P_{L_{lm}}(L)\cdot \Phi\left(\frac{T - \hat{\tau}_L}{\hat{\sigma}_L}\right)\right]. $$

Время T_{lm}^{β}, необходимое для обслуживания пассажиров на промежутке от станции l=1,2,…,n-1 до станции m=l+1,l+2,…,n, является β-квантилью распределения $G_{lm}(T)$, т.е.

$$ T_{lm}^{(\beta)} = \sup\left\{T: \quad G_{lm}(T) \le \beta\right\}. $$

Резерв времени на обслуживание пассажиров на промежутке от станции l=1,2,…,n-1 до станции m=l+1,l+2,…,n равен $\bar{T}_{lm} = \sum_{i=l}^{m-1} t_{i,i+1}$, следовательно, количество кассиров на данном промежутке должно быть не меньше

$$ N_{lm} = \left\lceil \frac{T_{lm}^{(\beta)}}{\bar{T}_{lm}} \right\rceil. $$

Пусть $\left(l_0, m_0\right) = \arg\max_{(l,m)} N_{lm}$, тогда очевидно, что минимальное количество кассиров N_i на всех перегонах $\left(i, i+1\right): l_0 \le i < m_0$ равно N_{lm} . Минимальное количество кассиров на оставшихся перегонах определяется путем исключения фрагмента (l_0, m_0) из маршрута и рекурсивным применением данной процедуры для образовавшихся фрагментов.

Заключение

Автоматизированное обеспечение покупки билетов по системе «двойного учёта» позволяет не только удовлетворить потребности пассажиров в билетах, но и практически исключить потери за безбилетный проезд, негативные проявления человеческого фактора обслуживающего персонала, включая аутсорсинг. При осуществлении данного способа имеется возможность регистрации входного и выходного пассажиропотоков в общей базе данных с целью дальнейшей статистической обработки для объективного планирования как расписаний движения, так и работы кассиров.

Предложенные в работе методики обработки результатов мониторинга с целью директивного планирования работы кассиров демонстрируют эти возможности. Дальнейшее обобщение результатов данной работы на проблемы оперативного управления, основанного на вычислении апостериорных распределений вероятности, является предметом будущих исследований.

Список литературы

1. *Андреев А.В.* Использование аутсорсинга как одного из направлений оптимизации расходов пригородного комплекса железнодорожного транспорта // Бюллетень транспортной информации, 2008. Вып. № 12 (162). С. 33–36.

2. *Губская С.А., Ванина Т.С.* Метод учета оплаты проезда на поездах пригородного сообщения // Статистика. Моделирование. Оптимизация: сб. тр. Всерос. конф. (Челябинск, 28 ноября – 3 декабря 2011г.). Челябинск: Изд.центр ЮУрГУ. 2011 С.282–286.

3. *Губская С.А.* Мониторинг условий организации перевозки пассажиров в пригородном сообщении на Южно-Уральской железной дороге // Общие вопросы транспорта. Моделирование и оптимизация в логистических транспортных системах: сб. науч. тр. / отв.ред. Е.Н.Тимухина. Екатеринбург: Изд-во УрГУПС. 2011. Вып.89(172). С.31–37.

4. *Губская С.А.* Способ обеспечения оплаты проезда на пригородных поездах/ С.А.Губская // Материалы Междунар. науч.-практ. конф. «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании – 2010». Т. 1. Транспорт. Одесса: Черноморье, 2010. С.50–52.

5. *Деминг Э.* Выход из кризиса: Новая парадигма управления людьми, системами и процессами: пер. с англ. 3-е изд. М.: Альпина Паблишера, 2009. 419 с.

6. *Жестяников И.З., Козлов В.А.* Внедрение новых технологий в АСОКУПЭ // Автоматика, связь и информатика. 2008. №5. С.41–44.

7. *Шешукова Т.Г., Красильников Д.Г.* История и перспективы развития управленческого учета на предприятии // Вестник Пермского университета. Сер. Экономика. 2010. Вып. 4(7). С. 20-27.

8. *Jang W.* Dynamic scheduling of stochastic jobs on a single machine // European Journal of Operational Research. 2002. Vol. 138(3). P. 518–530.

9. *Movaghar A.* On queueing with customer impatience until the end of service // Stochastic Models. 2006. Vol. 22(1). P. 149–173.

10. *Ward A. and Kumar S.* Asymptotically optimal admission control of a queue with impatient customers // Mathematics of Operations Research. 2008. Vol. 33(1). P. 167–202.

11. *Zeltyn S. and Mandelbaum A.* Call centers with impatient customers: exact analysis and many-server asymptotics of the *M/M/n + G* queue. Ph.D. thesis. Israel Institute of Technology. 2004. 402 p.