

Подход к оценке рисков оператора платной автомобильной дороги

Целью исследования статьи является оценка рисков оператора платной дороги, возникающих при возникновении транспортных заторов на пунктах взимания платы. В Российской Федерации в инфраструктурных проектах, в том числе проектах платных автомобильных дорог, часто применяется организационно-правовая форма государственно-частного партнерства. Государственные органы имеют право контролировать качество управления дорогой оператором, концедент может начислять штрафные баллы за низкую эффективность эксплуатации, приводящую к возникновению транспортных заторов. Возврат инвестиций в инфраструктурных проектах, как правило, имеют долгосрочный характер, поэтому задача оценки рисков возможных потерь оператором платной дороги представляется достаточно актуальной.

Материалы и методы. Основным инструментом исследования является имитационное моделирование в программной среде AnyLogic, анализ полученных в результате имитационного моделирования данных проводился в среде статистического пакета R. Выбор инструментария обусловлен большим количеством факторов субъективного (иногда технического) характера, существенно влияющих на пропускную способность дороги на пунктах взимания платы, но не поддающихся строгой формализации. К таким факторам относятся отказы в считывании электронных средств оплаты проезда, перестроения водителей по полосам в зоне пунктов взимания платы, отсутствие денежных средств на момент проезда по автоматической полосе оплаты и другие. Все такие факторы моделируются в среде AnyLogic как случайные величины с богатым выбором функций распределения и их параметров.

Результаты. Создана имитационная модель пункта взимания платы на съезде с платной автомобильной дороги для

анализа пропускной способности пропускного пункта при различных конфигурациях полос оплаты, различных уровнях ошибок пользовательского поведения и обеспеченности водителей электронными средствами регистрации проезда. На примере пункта взимания платы автомобильной дороги «Западный скоростной диаметр» произведена оценка параметров транспортных заторов, возникающих при уменьшении количества работающих полос оплаты проезда на пунктах взимания платы. В случае возникновения затора для каждой конфигурации определены оценки количества транспортных средств в заторе, длины пробки, время ожидания в очереди на подъезде к пункту взимания платы в различное время суток, время существования пробки.

Заключение. На основании полученных результатов может быть проведена оценка рисков по невыполнению оператором дороги норматива по обеспечению пропускной способности. Для оценки рисков платной дороги в целом для каждого пропускного пункта целесообразно применять индивидуальную имитационную модель, учитывающую особенности его географического расположения, состава трафика на объекте, регулярности пользовательских корреспонденций, а также воздействия окружающей транспортно-логистической и социальной инфраструктуры. В выраженных промышленно-логистических районах города, в приграничных зонах между городом и областью, для анализа пропускной способности пунктов взимания платы может потребоваться дополнительная оценка интенсивности движения с учетом суточной, недельной и сезонной неравномерности потока.

Ключевые слова: Имитационное моделирование, платная дорога, система взимания платы.

Alexander Yu. Talavirya¹, Mikhail B. Laskin²

¹ St. Petersburg Polytechnic University named after Peter the Great, St. Petersburg, Russia

² St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

Risk Assessment Approach of Toll Road Operator

The purpose of the article is to assess the risks of a toll road operator arising in the event of traffic congestion at toll collection points. In the Russian Federation, in infrastructure projects, including toll road projects, the organizational and legal form of public-private partnership is often used. State authorities have the right to control the quality of the road management by the operator; the state can charge penalty points for low operational efficiency, leading to traffic congestion. The return on investment in infrastructure projects is of a long-term nature, therefore, the task of assessing the risks of possible losses by the toll road operator is quite relevant.

Materials and methods. The main research tool is simulation modeling in the AnyLogic software environment, the analysis of the data obtained as a result of simulation was carried out in the environment of the statistical package R. The choice of tools is determined by a large number of subjective (sometimes technical) factors that significantly affect the road capacity at toll collection points, but do not lend themselves to strict formalization. Such factors include refusals to read electronic

tolls, drivers changing lanes in the toll collection points, lack of money at the time of travel through the automatic toll lane, and others. All such factors are modeled in the AnyLogic environment as random variables with a rich choice of distribution functions and their parameters.

Results. A simulation model of a toll collection point at an exit from a toll road has been created to analyze the throughput of a toll booth with various configurations of toll lanes, various levels of user behavior errors and the provision of drivers with electronic means of travel registration. Using the example of a toll collection point for the "Western High-Speed Diameter" motorway, the parameters of traffic congestion that occur when the number of operating toll lanes on the toll collection point decreases are estimated. In the event of congestion, for each configuration, estimates of the number of vehicles in the congestion, the length of the congestion, the waiting time in the queue at the entrance to the toll collection point at different times of the day, and the time of congestion are determined.

Conclusion. Based on the results obtained, an assessment of the risks of non-compliance by the road operator with the standard for ensuring throughput can be carried out. To assess the risks of a toll road as a whole, it is advisable to use an individual simulation model for each toll collection point, taking into account the peculiarities of its geographical location, the composition of traffic at the facility, the regularity of user correspondence, as well as the impact of the surrounding transport,

logistics and social infrastructure. In pronounced industrial and logistics areas of the city, in the border zones between the city and the region, an additional assessment of traffic intensity may be required to analyze the throughput of toll collection points, taking into account the daily, weekly and seasonal unevenness of the traffic flow.

Keywords: simulation modeling, toll road, toll collection system.

Введение

На сегодняшний день, использование платных дорог в отечественной практике стало неотъемлемой составляющей транспортной сети, имеющей высокий спрос для частных пользователей и грузовых перевозчиков на территории всей страны. Формируемые транспортные коридоры, образуемые сетью платных дорог, позволяют минимизировать сроки и затраты на перемещение пассажиров и грузов между городскими агломерациями, а также повышать безопасность и комфорт вождения для водителей транспортных средств.

Платные автомобильные дороги обладают лучшими техническими показателями, позволяющими обеспечить большую пропускную способность и расчетную скорость движения, а также лучшую техническую оснащенность дорожной инфраструктуры, по сравнению с бесплатными дорогами-дублерами. Вместе с тем, к автомобильным дорогам, эксплуатируемым на платной основе, предъявляются повышенные требования к качеству их содержания и эксплуатации. При этом, недостаточное качество предоставляемых услуг, выполняемых эксплуатирующей организацией — оператором дороги, может привести к повышению его экономических рисков, установленных в рамках соглашения с владельцем платной дороги.

Возникновение экономических рисков при эксплуатации платной дороги

При реализации отечественных инфраструктурных проектов, в том числе платных автомобильных дорог, распространенной является практика их реализации на условиях государственно-частного партнерства (далее — ГЧП). Эффективность такого способа привлечения инвестиционных ресурсов для развития экономического сектора России отмечена в работах Марковской Е.И. [1] Масловой С.В. [2–4], Котарева С.Н., Котаревой О.В. [5], Бузырева В.В., Сергеевой Н.Ю. [6]. Как отмечено Алешиной И.А. и Геращенко Т.М. [7], из различных форм ГЧП, наиболее распространенным и сложным типом соглашения, применяемым в мировой практике в дорожно-строительной отрасли, является концессионное соглашение — договор, по которому концессионер обязуется за свой счет создать объект транспортной ин-

фраструктуры, право собственности на которое принадлежит концеденту, а также осуществлять эксплуатацию объекта концессионного соглашения в течение оговоренного договором срока. Концессионер может обеспечивать эксплуатацию инфраструктурного объекта как самостоятельно, так и с привлечением специализированной организации — оператора платной дороги.

Как отмечено в исследовании Шевёлкиной К.Л. [8], возврат инвестиций при реализации проекта в рамках концессионного соглашения может достигать 20–30 лет, при этом он предусматривает возложение рисков, связанных с трафиком на концессионера. Автор отмечает, что в качестве возврата инвестиций концессионера, концедентом возмещаются инвестиционный и эксплуатационный платежи. Под эксплуатационным платежом понимается оплата расходов на работы по содержанию, оперированию, эксплуатации и ремонту элементов инфраструктуры платной дороги, которая индексируется на инфляцию, и может быть уменьшена на объем штрафов за некачественную эксплуатацию, как отмечено в работе [9]. Автором руководства по ГЧП [10] уточняется, что механизм штрафов предусматривает вычет определенных сумм из производимых владельцем дороги выплат за дефекты дороги или услуг, например, за недостатки эксплуатации, низкую безопасность и эстетичность. В качестве инструмента по исчислению объема штрафов может быть использована система штрафных баллов, привязанная к эксплуатационным показателям объекта и имеющая эквивалент в денежном выражении.

В состав обязанностей по эксплуатации платной дороги может входить поддержание транспортно-экономических показателей автомобильной дороги. В работе Сильянова В.В., Домке Э.Р. [11] под такими показателями понимаются группы переменных во времени величин, которые используются для оценки качества автомобильной дороги. Они характеризуют транспортное функционирование дороги, технико-эксплуатационные качества дорожной одежды и земляного полотна, а также общее состояние дороги, условия движения и эффективность работы. Так, к первой группе транспортно-эксплуатационных показателей относятся такие параметры, как интенсивность, объем, состав движения; пропускная и провозная способность дороги; коэффициент загрузки дороги движением; время сообщения и скорость дви-

жения. В таком случае, для такой дорожной ситуации, как возникновение затора на участке автомобильной дороги или на пункте взимания платы (далее — ПВП) может быть установлен штраф, уменьшающий стоимость эксплуатационного платежа. Таким образом, владелец инфраструктурного объекта снижает возникновение риска недоступности дороги, когда объект или его часть недоступны для надлежащего использования по вине оператора (в том числе в результате невыполнения необходимого объема работ по содержанию объекта) [12].

Возникновение затора на участке платной автомобильной дороги является не только осложнением транспортной обстановки для пользователей дороги, увеличивающим их время в пути, но также и финансовым риском для концессионера. В этой связи возникает задача оценки рисков оператора дороги и прогнозирования ситуаций, приводящих к образованию транспортных заторов. В настоящей статье рассматривается возникновение затора при изменении режима работы системы взимания платы (далее — СВП) на ПВП. Инструментом оценки и прогнозирования возникновения затора на пропускном пункте может являться имитационная модель ПВП, пример работы которой приведен ниже.

Имитационная модель ПВП

В качестве примера платной автомобильной дороги была выбрана платная автомобильная дорога «Западный скоростной диаметр» (далее — ЗСД), в г. Санкт-Петербурге. Отметим, что данный инфраструктурный проект был реализован на условиях ГЧП [13].

Имитационная модель была разработана на примере ПВП «Основной ход перед КАД (Север) в сторону КАД», расположенном на Северном участке ЗСД. Данный ПВП имеет конфигурацию СВП с 9-ю полосами оплаты проезда, 5 из которых функционируют в автоматическом режиме, а оставшиеся 4 — в ручном режиме. Автоматический режим подразумевает оплату проезда транспортным средством по транспондеру в безостановочном режиме, при движении на скорости не более 30 км/час. Ручной режим подразумевает оплату проезда наличными средствами или банковской картой, с остановкой на полосе.

Данные об интенсивности, составе трафика и времени обслуживания, были получены путем визуального подсчета проезжающих транспортных средств через ПВП с расположенной на ней онлайн-камеры с веб-сайта оператора дороги [14] в период с октября по ноябрь 2019 года. В рассматриваемый период времени не наблюдалось значительных колебаний трафика, связанных с производением крупных городских

культурно-массовых мероприятий, которые бы могли привести к наличию значительных изменений в недельном цикле интенсивности трафика. На изучаемом направлении движения в течение рабочих дней с понедельника по пятницу, наблюдалась интенсивность движения, не превышающая 3500 ТС в час. В выходные дни график интенсивности потока транспортных средств изменялся, но также не превышал 3500 ТС в час.

На рис. 1 показаны графики наблюдаемой интенсивности на ПВП «Основной ход перед КАД (Север) в сторону КАД».

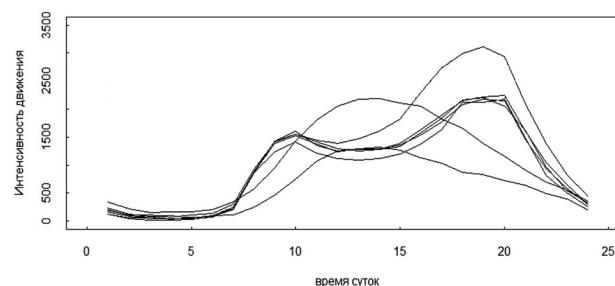


Рис. 1. Наблюдаемая интенсивность движения на ПВП «Основной ход перед КАД (Север) в сторону КАД» по дням недели с 0:00 часов по 24:00 (интенсивность — в количестве транспортных средств в час).

Fig. 1. Observed traffic intensity at the toll collection point “The main run in front of the Ring Road (North) towards the Ring Road” on days of the week from 0:00 to 24:00 (intensity - in the number of vehicles per hour)

При разработке имитационной модели были использованы параметры, описанные в работе [15].

В существующей (стандартной) конфигурации ПВП обладает пропускной способностью, достаточной для пропуска пиковой интенсивности машин без возникновения затора. Тем не менее, пропускная способность пункта в существующей конфигурации СВП приближена к максимальной интенсивности движения на данном участке дороги по пятницам в вечерние часы пик. При изменении количества функционирующих полос оплаты, снижение пропускной способности ПВП может привести к образованию затора.

При осуществлении эксплуатационной деятельности, оператор платной дороги может столкнуться с вынужденной необходимостью уменьшения количества функционирующих полос. Такая необходимость может возникать, при выходе из строя технологического оборудования на полосе, проведении технического обслуживания на полосе, или возникновения на ней ДТП по вине пользователя. В таких случаях, при прекращении функционирования одной или нескольких автоматических, или ручных полос оплаты, применение ими-

тационного моделирования позволяет оценить пропускную способность ПВП с измененной конфигурацией СВП, а также произвести анализ риска возникновения затора и его параметров.

В настоящем исследовании была проведена оценка изменений стандартного режима работы ПВП (5 автоматических и 4 ручных полос) со следующими конфигурациями:

1. 4 автоматических и 4 ручных полосы;
2. 3 автоматических и 4 ручных полосы;
3. 4 автоматических и 3 ручных полосы;
4. 5 автоматических и 3 ручных полосы;
5. 5 автоматических и 2 ручных полосы.

В условиях возникновения дорожного затора при изменении режима работы пропускного пункта, интерес представляют такие параметры как:

1. длина очереди;
2. количество транспортных средств, стоящих в очереди;
3. время ожидания транспортных средств до пересечения линии зоны подъезда к ПВП

При рассмотрении указанных показателей мы принимаем следующие допущения:

- линия въезда в зону ПВП – воображаемая линия, пересекающая дорогу на расстоянии 200 метров от зоны оплаты на полосе, перед расширением проезжей части дороги;

- линия окончания зоны ПВП – воображаемая линия, пересекающая дорогу на расстоянии 200 метров после зоны оплаты на полосе, перед сужением проезжей части дороги;

- очередь транспортных средств рассматривается как накопитель, который находится перед линией въезда в зону ПВП, при этом емкость накопителя неограничена;

- образование очереди считается наличие транспортных средств у линии въезда в зону ПВП, со снижением средней скорости их движения до 10 км/ч. Если интенсивность входного потока увеличивается и достигает предельной пропускной способности ПВП, очередь нарастает. Мы считаем очередь сформировавшейся, если последние 200 метров перед расширением полос заняты транспортными средствами;

- транспортное средство может покинуть очередь, только двигаясь вперед через ПВП, иных способов покинуть очередь нет;

- очередь образуется при достижении входным потоком интенсивности пороговой величины λ^{exit} , характерной для ПВП с определенной конфигурацией СВП;

- пока перед зоной ПВП сохраняется очередь, выходной поток будем считать пуассоновским и стационарным (с постоянной интенсивностью λ^{exit});

- входной поток будем считать пуассоновским и стационарным (с постоянной интенсив-

ностью λ) или нестационарным (с переменной интенсивностью $\lambda(t)$).

Распределение случайной величины «длина очереди»

Пусть X – случайная величина, количество транспортных средств, выезжающих из зоны ПВП в единицу времени, распределенная по закону Пуассона с параметром λ^{exit} , т.е.

$$P(X = m) = \frac{\lambda^{exit m}}{m!} e^{-\lambda^{exit}}$$

Пусть Y – случайная величина, количество транспортных средств прибывающих к началу очереди, в единицу времени, распределенная по закону Пуассона с параметром λ , т.е.

$$P(Y = n) = \frac{\lambda^n}{n!} e^{-\lambda}$$

Тогда величина $V = Y - X$ также будет являться дискретной случайной величиной. Закон распределения этой величины задается следующей дискретной функцией:

$$\begin{aligned} f(k, \lambda, \lambda^{exit}) &= P(V = k) = \\ &= e^{-(\lambda + \lambda^{exit})} \left(\frac{\lambda}{\lambda^{exit}} \right)^{\frac{k}{2}} I_{|k|} \left(2\sqrt{\lambda \times \lambda^{exit}} \right). \end{aligned}$$

где $I_{|k|}(x)$ – модифицированная функция Бесселя первого рода, при $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \infty$. Данное распределение впервые описано Дж.Скелламом в работе [16].

Запишем:

$$\begin{aligned} I_{|k|} \left(2\sqrt{\lambda \times \lambda^{exit}} \right) &= \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{m! \Gamma(m + |k| + 1)} \left(\frac{2\sqrt{\lambda \times \lambda^{exit}}}{2} \right)^{2m + |k|} = \\ &= \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{m! \Gamma(m + |k| + 1)} (\lambda \times \lambda^{exit})^{m + \frac{|k|}{2}} \end{aligned}$$

Тогда:

$$\begin{aligned} f(k, \lambda, \lambda^{exit}) &= P(V = k) = \\ &= e^{-(\lambda + \lambda^{exit})} \times \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{m! \Gamma(m + |k| + 1)} \lambda^{m + |k|} \times \lambda^{exit m} \end{aligned}$$

Основными характеристиками случайной величины будут являться:

1. Математическое ожидание $E(V) = \lambda - \lambda^{exit}$,
2. Дисперсия V : $D(V) = \lambda + \lambda^{exit}$,
3. Стандартное отклонение: $\sigma(V) = \sqrt{\lambda + \lambda^{exit}}$,
4. Коэффициент асимметрии: $\gamma_1 = \frac{\lambda - \lambda^{exit}}{(\lambda + \lambda^{exit})^{\frac{3}{2}}}$

Очевидно, что симметричным это распределение является только в случае $\lambda = \lambda^{exit}$.

Плотность вероятности распределения Скеллама для различных значений параметров λ ,

$\lambda^{exit} : \lambda^{exit} = 60; \lambda = 48; 60; 72$ показана на рис. 2. Плотность вероятности определена только для целых значений k .

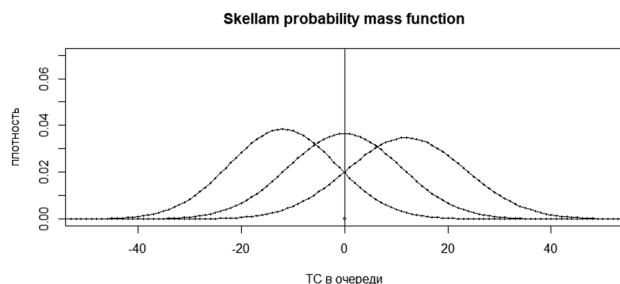


Рис. 2. Примеры функций вероятностей распределения Скеллама для различных соотношений интенсивностей входного и выходного потока. При $\lambda \leq \lambda^{exit}$ максимум (мода) меньше нуля, при $\lambda \geq \lambda^{exit}$ максимумы больше нуля

Fig. 2. Examples of the probability functions of the Skellam distribution for different ratios of the intensities of the input and output flow. For $\lambda \leq \lambda^{exit}$ the maximum (mode) is less than zero, for $\lambda \geq \lambda^{exit}$ the maximums are greater than zero.

Размерность интенсивностей указана как количество транспортных средств в минуту (60 единиц соответствуют интенсивности 3600 транспортных средств в час, 48 единиц – интенсивности 2880 транспортных средств в час, 72 единиц – интенсивности 4320 транспортных средств в час).

Из рис. 2 можно сказать, что:

- если $\lambda = \lambda^{exit}$, то вероятность образования затора равна 0,5, вероятность его отсутствия также равна 0,5;
- если $\lambda < \lambda^{exit}$, то вероятность образования затора меньше 0,5, она положительна и асимптотически стремится к 0 при $\lambda \rightarrow 0$;
- если $\lambda > \lambda^{exit}$, то вероятность образования затора больше 0,5, и асимптотически стремится к 1 при $\lambda \rightarrow +\infty$.

Пусть V^* – случайная величина, обозначающая длину очереди, образующей затор. Тогда запишем закон ее распределения в следующем виде:

$$P(V^* = k) = \begin{cases} 0, & \text{при } k < 0 \\ f(k, \lambda, \lambda^{exit}), & \text{при } k \geq 0 \end{cases}, k \in Z$$

или

$$P(V^* = k) = \begin{cases} 0, & \text{при } k < 0 \\ e^{-(\lambda + \lambda^{exit})} \times \left(\frac{\lambda}{\lambda^{exit}} \right)^{\frac{k}{2}} I_{|k|} \left(2\sqrt{\lambda \times \lambda^{exit}} \right) & \text{при } k \geq 0 \end{cases}, k \in Z$$

Значения функций Бесселя легко находятся с помощью библиотечных функций статистического пакета R.

Длина очереди $V^*(t_0, \tau)$, которая образовалась в течение периода времени $[t_0, t_0 + \tau]$ с услови-

ем, что интенсивность входного потока λ была постоянной, также будет дискретной случайной величиной. Ее закон распределения:

$$P(V^*(t_0, \tau) = k) = \begin{cases} 0, & \text{при } k < 0 \\ e^{-(\lambda + \lambda^{exit})\tau} \times \left(\frac{\lambda}{\lambda^{exit}} \right)^{\frac{k}{2}} I_{|k|} \left(2\tau\sqrt{\lambda \times \lambda^{exit}} \right) & \text{при } k \geq 0 \end{cases}, k \in Z$$

Длина очереди $V^*(t_0, \tau)$, которая образовалась в течение периода времени $[t_0, t_0 + \tau]$, с условием, что интенсивность входного потока $\lambda(t)$ также будет дискретной случайной величиной с законом распределения:

$$P(V^*(t_0, \tau) = k) = \begin{cases} 0, & \text{при } k < 0 \\ e^{-(\Lambda(t_0, \tau) + \lambda^{exit}\tau)} \times \left(\frac{\Lambda(t_0, \tau)}{\lambda^{exit}\tau} \right)^{\frac{k}{2}} I_{|k|} \left(2\sqrt{\Lambda(t_0, \tau) \times \lambda^{exit}\tau} \right) & \text{при } k \geq 0 \end{cases}, k \in Z,$$

где $\Lambda(t_0, \tau) = \int_{t_0}^{t_0 + \tau} \lambda(t) dt$ и t_0 – момент начала образования затора.

Для рассматриваемого пропускного пункта были проведены эксперименты по моделированию ситуаций, приводящих к образованию дорожных заторов. В табл. 1 показаны интенсивности, при которых для различных конфигураций ПВП образовывались заторы.

Таблица 1

Значения интенсивности, при которых появляются дорожные заторы при различных конфигурациях ПВП

Table 1

Intensity values at which traffic congestions appear at various configurations of the toll collection point

Конфигурация ПВП		Порог интенсивности, при которой появляются заторы
Автоматические полосы	Ручные полосы	
5	4	3500 ТС в час (≈58 ТС/мин.)
4	4	3200 ТС в час (≈53 ТС/мин.)
3	4	2750 ТС в час (≈46 ТС/мин.)
4	3	2800 ТС в час (≈47 ТС/мин.)
5	3	2500 ТС в час (≈42 ТС/мин.)
5	2	2200 ТС в час (≈37 ТС/мин.)

На рис. 3 показаны наблюдавшиеся суточные интенсивности транспортного потока на

ПВП «Основной ход перед КАД (Север) в сторону КАД» для различных дней недели, где пунктирными линиями обозначены уровни, соответствующие интенсивностям движения через ПВП 2200, 2500, 2750, 2800, 2850, 3200 транспортных средств в час.

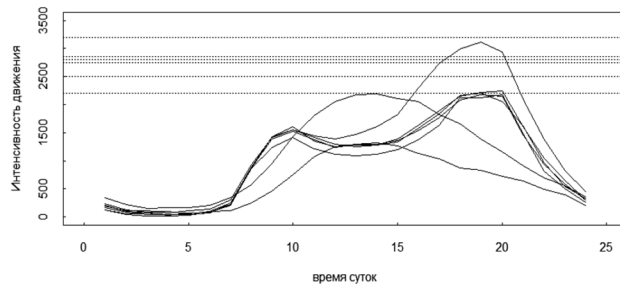


Рис. 3. Наблюдаемая интенсивность движения на ПВП «Основной ход перед КАД (Север) в сторону КАД» по дням недели с 0:00 часов по 24:00 с отмеченными интенсивностями движения через ПВП 2200, 2500, 2750, 2800, 2850, 3200 ТС/час.

Fig. 3. Observed traffic intensity at the toll collection point “The main run in front of the Ring Road (North) towards the Ring Road” on days of the week from 0:00 to 24:00 with the marked traffic intensities through the toll collection point 2200, 2500, 2750, 2800, 2850, 3200 vehicle / hour

Заметим, что, исходя из данных, приведенных в табл. 1 и на рис. 3 очевидно, что риск возникновения затора в 19:00 при стандартной конфигурации СВП на исследуемом ПВП является незначительным. При закрытии одной полосы, риск возникновения затора повышается. Закрытие двух и более полос с высокой долей вероятности может привести к образованию затора в пятницу, в промежутке времени с 16:00 до 21:00. Очевидно, что при активном жилом строительстве в зоне повышенной транспортной доступности со стороны автомобильной дороги, увеличении количества зарегистрированного транспорта в городе, а также повышении состава транзитного трафика на платной дороге будет возрастать риск образования заторов. Риск возникновения дорожных заторов будут подвержены, прежде всего, все рабочие дни в промежутке времени с 16:00 до 21:00, а также в субботу в промежутке времени с 11:00 до 17:00.

Время ожидания в очереди

Как и раньше, $X \in \text{Poisson}(\lambda^{\text{exit}})$ — случайная величина, количество транспортных средств, которые покидают зону ПВП, в единицу времени. $Y \in \text{Poisson}(\lambda)$ — случайная величина, количество прибывающих транспортных средств к началу очереди, в единицу времени. Обозначим как X_t — случайную величину, количество транспортных средств, покидающих зону ПВП за время t . Очевидно, что $X_t \in \text{Poisson}(\lambda^{\text{exit}} t)$.

Рассмотрим случайную величину $V = Y - X_t$. Величина V имеет распределение Скеллама со следующим законом распределения:

$$f(k, \lambda, \lambda^{\text{exit}} t) = P(V = k) = e^{-(\lambda + \lambda^{\text{exit}} t)} \left(\frac{\lambda}{\lambda^{\text{exit}}} \right)^{\frac{k}{2}} I_{|k|} (2 \times \sqrt{\lambda \lambda^{\text{exit}} t})$$

где $I_{|k|} (2 \times \sqrt{\lambda \lambda^{\text{exit}} t})$ модифицированная функция Бесселя 1 рода.

В таком случае, справедливым будет следующее представление:

$$I_{|k|} (2 \times \sqrt{\lambda \lambda^{\text{exit}} t}) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{m! \Gamma(m + |k| + 1)} \lambda^{m+|k|} \times (\lambda^{\text{exit}} t)^m$$

Вероятность того, что V примет значение 0 равна:

$$\begin{aligned} E(T) &= \int_0^{+\infty} \lambda^{\text{exit}} t \times f(0, \lambda, \lambda^{\text{exit}} t) dt = \\ &= \int_0^{+\infty} e^{-(\lambda + \lambda^{\text{exit}} t)} \times \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{m! \Gamma(m + 1)} \times (\lambda \lambda^{\text{exit}} t)^m \lambda^{\text{exit}} t^{m+1} dt = \\ &= e^{-(\lambda + \lambda^{\text{exit}} t)} \times I_0 (2 \sqrt{\lambda \lambda^{\text{exit}} t}) \end{aligned}$$

Таким образом, каждому $t \in [0, +\infty)$ ставится в соответствие некоторое значение $f(0, \lambda, \lambda^{\text{exit}} t)$, зависящее от t . Рассмотрим $f(0, \lambda, \lambda^{\text{exit}} t)$ как функцию от t и проинтегрируем её по $t \in [0, +\infty)$:

$$\begin{aligned} &\int_0^{+\infty} f(0, \lambda, \lambda^{\text{exit}} t) dt = \\ &= \int_0^{+\infty} e^{-(\lambda + \lambda^{\text{exit}} t)} \times \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{m! \Gamma(m + 1)} \times (\lambda \lambda^{\text{exit}} t)^m dt = \\ &= e^{-\lambda} \times \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{m! \Gamma(m + 1)} \times (\lambda \lambda^{\text{exit}})^m \int_0^{+\infty} e^{-\lambda^{\text{exit}} t} t^m dt = \\ &= e^{-\lambda} \times \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{m! \Gamma(m + 1)} \times (\lambda \lambda^{\text{exit}})^m \times \frac{1}{\lambda^{\text{exit} m+1}} \Gamma(m + 1) = \\ &= \frac{e^{-\lambda}}{\lambda^{\text{exit}}} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\lambda^{\text{exit} m}}{m!} = \frac{1}{\lambda^{\text{exit}}} \end{aligned}$$

Нормируем $f(0, \lambda, \lambda^{\text{exit}} t)$ на $\frac{1}{\lambda^{\text{exit}}}$ и рассмотрим следующую функцию

$$\begin{aligned} f^*(0, \lambda, \lambda^{\text{exit}} t) &= \lambda^{\text{exit}} f(0, \lambda, \lambda^{\text{exit}} t) = \\ &= \lambda^{\text{exit}} \times e^{-(\lambda + \lambda^{\text{exit}} t)} \times I_0 (2 \sqrt{\lambda \lambda^{\text{exit}} t}) \end{aligned} \quad (1)$$

как функцию плотности распределения случайной величины T . Под величиной T будем подразумевать время, за которое все транспортные средства, прибывшие к началу уже сформированного затора за единицу времени (с интенсивностью λ) смогут покинуть затор, при условии, что интенсивность потока транспортных средств, которые покидают затор за единицу времени равна λ^{exit} .

Математическое ожидание величины T будет равно:

$$\begin{aligned}
 E(T) &= \int_0^{+\infty} \lambda^{exit} t \times f(0, \lambda, \lambda^{exit} t) dt = \\
 &= \int_0^{+\infty} e^{-(\lambda + \lambda^{exit} t)} \times \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{m! \Gamma(m+1)} \times (\lambda \lambda^{exit})^m \lambda^{exit} t^{m+1} dt = \\
 &= e^{-\lambda} \times \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{m! \Gamma(m+1)} \times \lambda^{exit} \times (\lambda \lambda^{exit})^m \int_0^{+\infty} e^{-\lambda^{exit} t} t^{m+1} dt = \\
 &= e^{-\lambda} \times \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{m! \Gamma(m+1)} \times \lambda^{exit} \times (\lambda \lambda^{exit})^m \times \frac{1}{\lambda^{exit m+2}} \Gamma(m+2) = \\
 &= \lambda^{exit} \frac{e^{-\lambda}}{\lambda^{exit 2}} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\lambda^m}{m!} (m+1) = \frac{e^{-\lambda}}{\lambda^{exit 2}} \times (\lambda e^{\lambda} + e^{\lambda}) = \frac{\lambda+1}{\lambda^{exit}}, \\
 E(T) &= \frac{\lambda+1}{\lambda^{exit}} \quad (2)
 \end{aligned}$$

Дисперсия и стандартное отклонение величины T будет равно:

$$\begin{aligned}
 &\int_0^{+\infty} \lambda^{exit} t^2 \times f(0, \lambda, \lambda^{exit} t) dt = \\
 &= \int_0^{+\infty} e^{-(\lambda + \lambda^{exit} t)} \times \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{m! \Gamma(m+1)} \times \lambda^{exit} \times (\lambda \lambda^{exit})^m t^{m+2} dt = \\
 &= e^{-\lambda} \times \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{m! \Gamma(m+1)} \times \lambda^{exit} \times (\lambda \lambda^{exit})^m \int_0^{+\infty} e^{-\lambda^{exit} t} t^{m+2} dt = \\
 &= e^{-\lambda} \times \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{m! \Gamma(m+1)} \times \lambda^{exit} \times (\lambda \lambda^{exit})^m \times \frac{1}{\lambda^{exit m+3}} \Gamma(m+3) = \\
 &= \frac{e^{-\lambda}}{\lambda^{exit 2}} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\lambda^m}{m!} (m+2)(m+1) = \frac{\lambda^2 + 3\lambda + 2}{\lambda^{exit 2}}.
 \end{aligned}$$

Следовательно, дисперсия равна

$$\begin{aligned}
 D &= \frac{\lambda^2 + 3\lambda + 2}{\lambda^{exit 2}} - \left(\frac{\lambda+1}{\lambda^{exit}} \right)^2 = \\
 &= \frac{\lambda^2 + 3\lambda + 2 - \lambda^2 - 2\lambda - 1}{\lambda^{exit 2}} = \frac{\lambda+1}{\lambda^{exit 2}}.
 \end{aligned}$$

Стандартное отклонение равно

$$\sigma = \frac{\sqrt{\lambda+1}}{\lambda^{exit}} \quad (3)$$

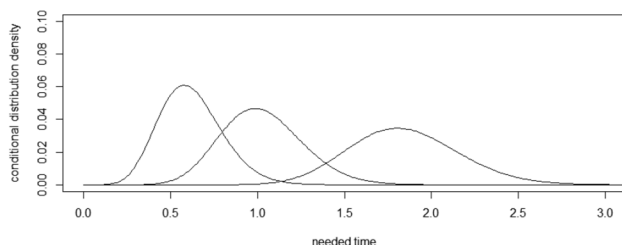


Рис. 4. Плотность распределения случайной величины T , при $\lambda^{exit} = 36.67$ и $\lambda = 21.67; 36.67; 66.67$ транспортных средств в минуту (1300; 2200; 4000 ТС/час).

Fig. 4. Density of distribution of a random variable T , with $\lambda^{exit} = 36.67$ and $\lambda = 21.67; 36.67; 66.67$ vehicles per minute (1300; 2200; 4000 vehicles / hour)

На рис. 4 показаны функции распределения случайной величины T , при разных соотноше-

ниях λ и λ^{exit} : $\lambda^{exit} = 36.67$ и $\lambda = 21.67; 36.67; 66.67$.

Выборочные математическое ожидание, дисперсия, стандартное отклонение могут быть получены в среде статистического пакета R, мода может быть получена с использованием библиотечной функции R `which.max()`. Полученные значения математического ожидания, наиболее вероятного значения величины T , математическое ожидание, дисперсия и стандартное отклонение, полученные по формулам (2),(3) показаны в табл. 2.

Таблица 2

Числовые характеристики величины T , полученные по формулам (2), (3)

Table 2

Numerical characteristics of the T value obtained by formulas (2), (3)

Входная интенсивность ТС/час	Значения моделирования в R		Расчетные значения		
	Математические ожидания (час)	Наиболее вероятное значение (час)	Математические ожидания (час)	Дисперсия	Стандартное отклонение (час)
21,67	0,618	0,577	0,618	0,0169	0,130
36,67	1,027	0,986	1,027	0,0279	0,137
66,67	1,845	1,805	1,845	0,0502	0,224

Изменение размерности интенсивностей и масштаба времени

Наиболее распространенным является изменение интенсивности движения в единицах ТС в час. При использовании таких размерностей использование формулы (1) в расчетах становится невозможным, т.к. соответствующие экспоненты и значения модифицированной функции Бесселя обращаются в машинный ноль. Таким образом, для расчетов целесообразно изменение размерности интенсивностей и масштаба времени. Оптимальным будет такое изменение размерностей, чтобы аргументы функций в формуле (1) могли позволить получить численные значения с достаточной точностью. Допустим, нам необходимо получить оценку ожидания времени прохождения транспортным средством затора в часах, имея значение интенсивности, выраженной в единицах в час. Интенсивности $\lambda^{exit} = 36.67$ и $\lambda = 21.67; 36.67; 66.67$, у которых ранее была размерность в единицах в минуту, пересчитываются в размерность единицы в час: $\lambda^{exit} = 2200$, $\lambda = 1300; 2200; 4000$. Данная размерность все еще не пригодна для произведения расчетов экспонент и значений функций Бесселя.

Представляется целесообразным рассмотреть часовые интенсивности в сотнях транспортных средств в час ($\lambda^{exit} = 22$, $\lambda = 13; 22; 40$). Пара-

метры законов распределения времени, а также числовые характеристики величины T , полученные по формулам (2), (3), выраженные уже в часах, приведены на рис. 5 и табл. 3.

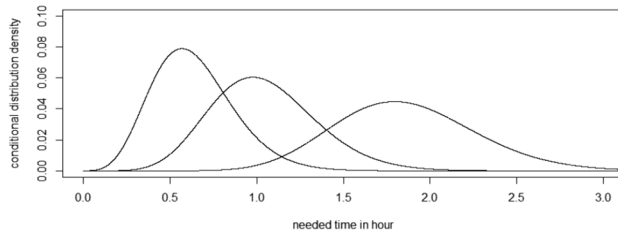


Рис. 5. Плотность распределения случайной величины T , при $\lambda^{exit} = 22$ (100 ТС/час) и $\lambda = 13; 22; 40$ (100 ТС/час)

Fig. 5. Density of distribution of a random variable T , with $\lambda^{exit} = 22$ (100 vehicles / hour) and $\lambda = 13; 22; 40$ (100 vehicles / hour)

Таблица 3

Числовые характеристики величины T , полученные по формулам (2), (3) в часах

Table 3

Numerical characteristics of the T value, obtained by formulas (2), (3) in hours

Входная интенсивность 100 ТС/час	Значения моделирования в R		Расчетные значения		
	Математические ожидания (час)	Наиболее вероятное значение (час)	Математические ожидания (час)	Дисперсия	Стандартное отклонение (час)
13	0,636	0,568	0,636	0,0289	0,170
22	1,045	0,977	1,045	0,0475	0,218
40	1,864	1,795	1,864	0,0847	0,291

Отметим незначительную асимметрию полученных законов распределения (модальное значение отличается от среднего в пределах от 3,8% до 12%), при этом стандартное отклонение существенно. Физическим смыслом случайной величины T является время, в течение которого транспортные средства, прибывшие к началу уже образовавшегося затора, покинут его. При малых единицах времени (секундах, минутах), интенсивность входящего потока в единицу времени будет практически неизменной. Однако при более крупных единицах времени (часах), интенсивность в течение такой единицы времени не может быть рассмотрена как постоянная. При этом, размерность интенсивности потока, выраженная в сотнях транспортных средств в час, позволяет рассчитать соответствующие экспоненты и значения функций Бесселя. При переменной интенсивности входного потока $\lambda = \lambda(h)$, где h является временем суток, будет рассматриваться параметр интенсивности входного потока в виде:

$$\Lambda(h_0, \tau) = \int_{h_0}^{h_0 + \tau} \lambda(h) dh,$$

где h_0 является моментом времени начала образования затора.

В статье [17] было показано, что суточные интенсивности, приведенные на рис. 3, могут быть хорошо аппроксимированы первыми n членами тригонометрического ряда:

$$f(h) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \times \cos\left(k \frac{2\pi}{\tau} h\right) + \sum_{k=1}^{\infty} B_k \times \sin\left(k \frac{2\pi}{\tau} h\right)$$

Здесь $\tau = 24$ (часа) является периодом, а $f(h)$ – интенсивностью движения в момент времени, равной h .

Введем вспомогательные переменные

$$x(h) = \cos\left(k \frac{2\pi}{\tau} h\right) \text{ и } y(h) = \sin\left(k \frac{2\pi}{\tau} h\right)$$

и получим линейную по коэффициентам модель суточной интенсивности следующего вида:

$$f(h) \cong \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n A_k \times x(h) + \sum_{k=1}^n B_k \times y(h) \quad (4)$$

В качестве примера, рассмотрим случай, когда суточная интенсивность на рисунке 3 достигает максимального значения. Этот случай характеризует дорожную ситуацию на ПВП в вечерний час-пик (в 19:00) в пятницу, по направлению на выезд из города. В стандартной конфигурации СВП с 5-ю автоматическими и 4-мя ручными полосами, максимальная интенсивность наблюдаемого потока однократно касается прямой линии, соответствующей значению интенсивности движения, при которой возникает затор, равной 3200 ТС/час, или 32 сотни ТС/час. Если рассмотреть другой случай, когда ПВП работает в конфигурации с 5-ю автоматическими и 2-мя ручными полосами, то в период с 16:00 до 21:00 перед въездом на пропускной пункт будет образован затор, как показано на рис. 6.

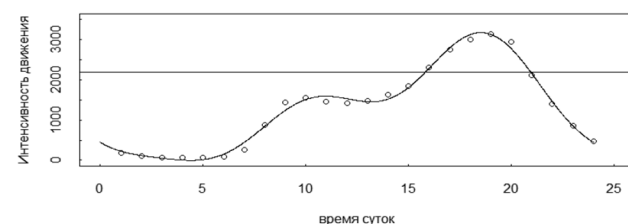


Рис. 6. Интенсивность движения на ПВП «Основной ход перед КАД (Север) в сторону КАД» для пятницы, её аппроксимация функцией вида (4) при $n = 3$. Горизонтальная прямая линия, соответствует интенсивности входного потока 2200 ТС/час (22 сотни ТС/час), при которой образуется пробка при условии, что две ручные полосы не работают

Fig. 6. Intensity of traffic at the toll collection point “The main run in front of the Ring Road (North) towards the Ring Road” for Friday, its approximation by a function of the form (4) with $n=3$. A horizontal straight line corresponds to an input flow rate of 2200 vehicles / hour (22 hundreds of vehicles / hour), at which a traffic jam is formed, provided that two manual lanes are not working.

Некоторые возможные конфигурации полос, пропускные способности ПВП, параметры длины и времени ожидания затора, время егообразования

Table 4

Some possible configurations of lanes, capacity of toll collection point, parameters of length and waiting time of congestion, time of its formation

Автоматические полосы	Ручные полосы	Пропускная способность ПВП	Время максимального затора	Длина очереди, ТС	Длина очереди, км	Коридор длины очереди, км	Время ожидания в очереди, час	Коридор времени ожидания в очереди
5	4	3200	затора нет	—	—	—	—	—
4	4	2850	19:56	687	1,37	0,55–2,16	0:14	0:08–0:20
3	4	2750	20:07	995	1,99	1,16–2,82	0:22	0:15–0:28
4	3	2800	20:02	836	1,67	0,85–2,48	0:17	0:12–0:24
5	3	2500	20:33	1 933	3,87	2,96–4,77	0:46	0:38–0:54
5	2	2200	20:58	3 243	6,49	5,52–7,45	1:29	1:19–1:38

Результат работы библиотечной функции *lm* статистического пакета R показан на рис. 7. С помощью данной функции по формуле (4) мы определяем 7 коэффициентов (1 + 3 + 3) аппроксимации суточной интенсивности.

```
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-175.548  -44.344    5.193   35.640  206.192

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  1328.58      21.61   61.477 < 2e-16 ***
x[1, ]       -421.57      30.56  -13.794 1.16e-10 ***
x[2, ]       -326.41      30.56  -10.680 5.85e-09 ***
x[3, ]       -122.17      30.56   -3.997 0.000933 ***
y[1, ]       -1217.87      30.56  -39.848 < 2e-16 ***
y[2, ]       -393.74      30.56  -12.556 5.02e-10 ***
y[3, ]        271.44      30.56    8.881 8.55e-08 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 105.9 on 17 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9921, Adjusted R-squared:  0.9894
F-statistic: 357.5 on 6 and 17 DF, p-value: < 2.2e-16
```

Рис. 7. 7 коэффициентов для аппроксимации суточной интенсивности движения пятницы первыми членами тригонометрического ряда вида (4)

Fig. 7. 7 coefficients for approximating the daily traffic intensity of Friday by the first members of the trigonometric series of the form (4)

Теперь мы применим формулы (2) и (3) для того, чтобы оценить длину очереди в вечерний час-пик в пятницу, при суточной интенсивности движения, показанной на рис. 6. Накопленная интенсивность будет иметь следующий вид:

$$\Lambda(h_0, \tau) = \int_{h_0}^{h_0 + \tau} \lambda(h) dh$$

h_0 является временем суток, соответствующим моменту возникновения затора, τ является длиной периода времени от момента возникновения затора.

T является случайной величиной, показывающей, во сколько раз больше времени, прибывающие (с интенсивностью λ) транспортные средства будут пребывать в очереди, по сравнению с единицей времени, в течение которой они прибыли в очередь ($\lambda > \lambda^{exit}$).

Случайная величина $T \times \tau$ показывает, во сколько раз период времени, за который прибывшие за время τ транспортные средства покинут очередь, больше τ . При этом, за время τ часть транспортных средств успеют покинуть очередь (в соответствии с интенсивностью λ^{exit}). Таким образом, случайное время ожидания в очереди будет соответствовать: $T \times \tau - \tau$.

Тогда:

$$E(T \times \tau - \tau) = \tau \times \frac{\Lambda(h_0, \tau) + 1}{\lambda^{exit} \tau} - \tau = \frac{\Lambda(h_0, \tau) + 1 - \lambda^{exit} \tau}{\lambda^{exit}}$$

$$\sigma(T \times \tau - \tau) = \tau \times \sigma(T) = \frac{\sqrt{\Lambda(h_0, \tau) + 1}}{\lambda^{exit}}$$

Соответствующие расчеты были реализованы в статистическом пакете R.

На рис. 8 приведена длина очереди, которая соответствует интенсивности движения (показана на рис. 6) транспортных средств в часы-пик вечером в пятницу. Размерность вертикальной оси обозначена в единицах транспортных средств. Пунктирными линиями показан коридор $\pm 3\sigma$ к математическому ожиданию длины очереди.

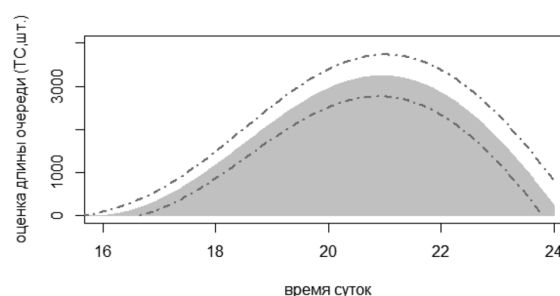


Рис. 8. Оценка длины очереди на ПВП «Основной ход перед КАД (Север) в сторону КАД» в течение суток

Fig. 8. Estimation of the queue length at the toll collection point "The main run in front of the Ring Road (North) towards the Ring Road" during the day

Как видно из рис. 8, наибольшая длина очереди соответствует времени 20:58, соответствующая 3243 транспортных средств. В этот момент коридор $\pm 3\sigma$ соответствует диапазону значений от 2760 до 3726 транспортных средств.

На рис. 9 приведено время ожидания транспортных средств в очереди, которое соответствует длине очереди, показанной на рис. 8. По вертикали обозначено время (в часах) ожидания транспортных средств в очереди перед въездом в зону ПВП. Пунктирными линиями показан коридор $\pm 3\sigma$ к среднему времени ожидания транспортных средств в очереди.

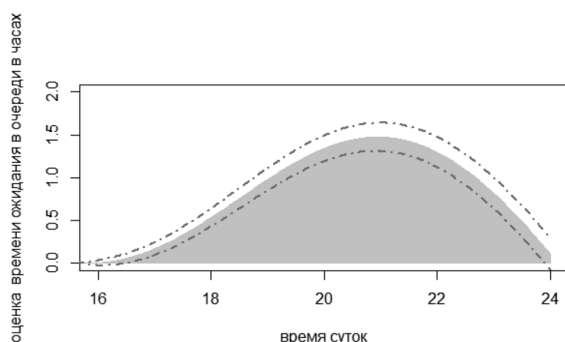


Рис. 9. Оценка времени ожидания транспортных средств в очереди. По горизонтали отмечено время прибытия транспортных средств к началу очереди

Fig. 9. Estimation of the waiting time for vehicles in the queue. The time of arrival of vehicles at the beginning of the queue is marked horizontally

Как видно из рис. 9, наибольшее время ожидания транспортных средств в очереди, прибывших к ее началу в 20:58, составляет 1 час 29 мин. В этот момент коридор $\pm 3\sigma$ соответствует диапазону времени от 1 час 19 мин. до 1 час 38 мин.

СВП на ПВП основного хода платной дороги может функционировать в разных конфи-

гурациях, имеющих разное количество и соотношение автоматических и ручных полос, для каждой из которых будет соответствовать своя предельная пропускная способность λ^{exit} .

В табл. 4 приведены следующие параметры: максимальная длина очереди, коридор максимальной длины очереди $\pm 3\sigma$, максимальное время ожидания транспортных средств в очереди, коридор максимального времени ожидания в очереди $\pm 3\sigma$, время прибытия транспортных средств к началу очереди. Оценка длины очереди приведена в километрах, из расчета формирования затора в 4 ряда, при условии, что транспортными средствами заняты 3 полосы движения и правая обочина.

Отметим, что аналогичные расчеты могут быть проведены как на наблюдаемой, так и увеличенной интенсивности, в целях прогнозирования функционирования СВП при повышении количества зарегистрированного в городе транспорта, планировании городской застройки, росте транзитного и локального трафика. Очевидно, что при увеличении интенсивности потока транспортных средств на рассматриваемом участке дороги всего на 10% (см. рис. 1), при рассмотренных конфигурациях СВП на данном ПВП могут возникать заторы в течение всех рабочих дней, а также субботы, в период времени с 11:00 до 16:00.

Оценка рисков

После проведения оценки параметров возникающих заторов, оценим экономические риски, которые могут возникать при эксплуатации ПВП, при изменении конфигурации СВП и потере функционирования полос оплаты.

Как отмечено авторами работы по оценке транспортных рисков в ГЧП-проектах [16], во многих концессионных соглашениях предусмо-

Таблица 6

Возможность возникновения затора продолжительностью более 30 минут при различных конфигурациях ПВП. Для дней недели значением «нет» отмечено отсутствие затора продолжительностью более 30 минут, «есть» — наличие такого затора, «риск» — высокий риск возникновения затора (пропускная способность конфигурации СВП примерно равна интенсивности движения на ПВП)

Table 6

Potential for congestion lasting more than 30 minutes with various toll collection point configurations. For days of the week, the value “no” indicates the absence of a congestion lasting more than 30 minutes, “yes” - the presence of such a congestion, “risk” - a high risk of a congestion (the capacity of the toll collection system configuration is approximately equal to the traffic intensity at the toll collection point)

№	Конфигурация СВП		Затор продолжительностью более 30 минут						
	Автоматические полосы	Ручные полосы	Пон.	Вт.	Ср.	Чт.	Пт.	Сб.	Вс.
1	5	4	нет	нет	нет	нет	риск	нет	нет
2	4	4	нет	нет	нет	нет	есть	нет	нет
3	3	4	нет	нет	нет	нет	есть	нет	нет
4	4	3	нет	нет	нет	нет	есть	нет	нет
5	5	3	нет	нет	нет	нет	есть	нет	нет
6	5	2	риск	риск	риск	есть	есть	риск	нет

трены финансовые санкции для концессионера, если дорога не работает в соответствии с установленными стандартами или если часть, или вся дорога недоступна для движения сверх согласованного или планового периода. Это помогает стимулировать концессионера к снижению эксплуатационных проблем и оптимизации управления трафиком. Стимулами к обеспечению высоких эксплуатационных показателей могут являться штрафы за низкие эксплуатационные показатели [17].

В качестве примера можно привести возможные риски ЗСД, связанные с отсутствием транспортной доступности дороги. На основе анализа открытых данных [18–24], одним из ключевых показателей эффективности концессионера, учитывающих отраслевую специфику, является наличие (количество) случаев невыполнения норматива пропускной способности на ПВП автомобильной дороги ЗСД, в результате которого образовался транспортный затор продолжительностью более 30 минут (динамика в сравнении с количеством случаев невыполнения норматива в предыдущем периоде). Отчетные данные концессионера за период с 2014 по 2019 год показывают наличие зафиксированных случаев, когда такой норматив не был выполнен. Данные о выполнении норматива приведены в табл. 5.

Таблица 5

Зафиксированные случаи по невыполнению норматива пропускной способности ПВП

Table 5

Recorded cases of non-compliance with the toll collection point throughput rate

Год	Кол-во случаев, шт.	Целевое значение	Фактическое значение
2014	51	н.д.	н.д.
2015	46	н.д.	н.д.
2016	42	н.д.	н.д.
2017	134	5%	н.д.
2018	20	-5%	-85% (20 случаев)
2019	н.д.	-100%	-55%

Исходя из приведенных в рис. 3 графиков интенсивностей на ПВП в течении недели и отметках пороговых интенсивностей для различных конфигураций ПВП, можно определить, как изменение режима функционирования ПВП приведет к образованию затора продолжительностью более 30 минут. Данные для рассматриваемых конфигураций ПВП «Основной ход перед КАД (Север) в сторону КАД» приведены в табл. 6.

Таким образом, изменения в работе конфигурации полос, вызванные выходом из строя как автоматических, так и ручных полос (в любом количестве) в вечерний час-пик в пятницу, являются наиболее критичными для оператора,

и могут привести к невыполнению концессионером норматива по пропускной способности и возникновению сопутствующих финансовых рисков. Потеря работоспособности двух ручных полос может привести к риску возникновения затора в будние дни, с понедельника по среду, а также в субботу. В четверг данная конфигурация также может привести к невыполнению норматива. Таким образом, для минимизации возникновения данных рисков при эксплуатации ПВП, оператору платной дороги необходимо уделять повышенное внимание любым изменениям в режимах работы СВП в пятницу, а также изменениям в режимах работы ручных полос в период с понедельника по субботу.

В то же время, с точки зрения прогнозирования рисков оператора при увеличении трафика, следует отметить, что систематическое увеличение потока транспорта всего на 10% приведет к хроническому образованию заторов в пятницу в период, примерно, с 17:00 до 21:00 при полной работоспособности полос ПВП.

Заключение

В работе рассмотрены вопросы оценки рисков оператора платной дороги, связанные с возможностью начисления владельцем объекта штрафных баллов за низкую эффективность эксплуатации, приводящую к возникновению транспортных заторов.

На примере ПВП платной автомобильной дороги ЗСД произведена оценка параметров транспортных заторов, возникающих при уменьшении количества работающих полос оплаты проезда на ПВП. Рассмотрено шесть различных конфигураций функционирования СВП. Для каждой конфигурации определены параметры возникающей очереди транспортных средств, в случае ее образования: максимальная длина очереди, коридор максимальной длины очереди $\pm 3\sigma$, максимальное время ожидания транспортных средств в очереди, коридор максимального времени ожидания в очереди $\pm 3\sigma$, время прибытия транспортных средств к началу очереди. Опираясь на существующие требования концедента платной дороги к эксплуатации, оценены существующие и возможные риски по невыполнению концессионером норматива по пропускной способности для рассмотренных конфигураций ПВП.

Отметим, что для оценки рисков платной дороги и находящихся на ней ПВП, для каждого пропускного пункта целесообразно применять индивидуальную имитационную модель, учитывающую особенности его географического расположения, состава трафика на объекте, регулярности пользовательских корреспонденций, а также воздействия окружающей транспор-

тно-логистической и социальной инфраструктуры. При размещении ПВП в ярко выраженных промышленно-логистических районах города, а также в приграничных зонах между городом и областью, для анализа пропускной способности ПВП может потребоваться дополнительная оценка интенсивности движения в различных

условиях, учитывающих суточную, недельную и сезонную неравномерность потока.

Дальнейшее направление исследований авторов ориентировано на изучение методов повышения эффективности функционирования ПВП платной автомобильной дороги, находящейся на эксплуатационной стадии.

Литература

1. Марковская Е. И. Механизмы государственно-частного партнерства. Теория и практика: учебник и практикум для вузов. М.: Юрайт, 2019. 491 с.

2. Маслова С.В. Ключевые риски в проектах государственно-частного партнерства в дорожном секторе и эффективные стратегии управления ими // Сборник тезисов докладов III ежегодной научной конференции «ГЧП в сфере транспорта: модели и опыт – 2017». 2017. С. 36–40.

3. Маслова С.В. Международные транспортные проекты государственно-частного партнерства как средство достижения целей устойчивого развития и национальных целей развития Российской Федерации // Сборник тезисов докладов IV ежегодной научной конференции «Государственно-частное партнерство в сфере транспорта: модели и опыт». 2018. С. 31–36.

4. Маслова С.В., Абдулжамалов Р. А., Бортников Н. А., Шибанов А. А. Государственно-частное партнерство в контексте национальных проектов России // Сборник тезисов докладов V ежегодной научной конференции «Государственно-частное партнерство в сфере транспорта: модели и опыт». 2019. С. 5–9.

5. Котарев С.Н., Котарева О.В. Современные тенденции развития государственно-частного партнерства в сфере транспорта // Успехи современной науки и образования. 2017. Т. 8. № 2. С. 100 – 103.

6. Бузырев В.В., Сергеева Н.Ю. Механизмы финансирования проектов строительства транспортной инфраструктуры в Российской Федерации и пути их совершенствования в современных условиях // Вестник факультета управления СПбГЭУ. 2017. № 2. С. 4–10.

7. Алешина И.А., Геращенко Т.М. Эффективный механизм реализации проектов развития транспортной инфраструктуры региона // Известия ТулГУ. Экономические и юридические науки. 2016. № 4(1). С. 12–20.

8. Шевелкина К.Л. Финансирование транспортной инфраструктуры на основе государственно-частного партнерства: диссертация кандидата экономических наук: 08.00.10. М.: Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, 2015.

9. Белая книга Государственной компании «Автодор» [Электрон. ресурс] // Официаль-

ный интернет-сайт компании ООО «Автодор Инвест». Режим доступа: <http://www.avtodor-invest.com/news/WhiteBook/>. (Дата обращения: 02.04.2021).

10. Делмон Д. Государственно-частное партнерство в инфраструктуре: практическое руководство для органов государственной власти. М.: TheWorldBank, 2010. 154 с.

11. Сильянов В.В., Домке Э.Р. Транспортно-эксплуатационные качества автомобильных дорог и городских улиц. М.: Академия, 2008. 352 с.

12. Инвестиционные проекты Государственной компании «Автодор» [Электрон. ресурс] // Официальный интернет-сайт компании ООО «Автодор Инвест». Режим доступа: <http://www.avtodor-invest.com/news/WhiteBook/>. (Дата обращения: 02.04.2021).

13. Соглашение о ГЧП [Электрон. ресурс] // Официальный интернет-сайт оператора ООО «Магистраль северной столицы». Режим доступа: <https://nch-spb.com/company/agreement/>. (Дата обращения: 25.03.2021).

14. Онлайн-камеры. Северный участок ЗСД. Основной ход перед КАД (Север) в сторону КАД [Электрон. ресурс] // Официальный интернет-сайт оператора ООО «Магистраль северной столицы». Режим доступа: <https://nch-spb.com/travel/cameras/>. (Дата обращения: 20.10.2020).

15. Талавирия А.Ю., Ласкин М.Б. Имитационное моделирование работы пункта взимания платы на основном ходу внутригородской платной дороги // Научно-практический журнал «Информатизация и связь». 2020. № 5. С. 67–77.

16. Skellam J.G. The frequency distribution of the difference between two Poisson variates belonging to different populations // Journal of the Royal Statistical Society. 1946. № 109(3). С. 296.

17. Ласкин М.Б., Свистунова А.С., Талавирия А.Ю. Оценка суточной интенсивности движения пункта взимания платы на съезде внутригородской платной дороги // Системный анализ в проектировании и управлении. Сборник научных трудов XXIV Международной Научно-практической конференции. (13–14 октября 2020, СПб). Под общ. ред. В.Н. Козлова, А.Н. Фирсова. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. № 2. С. 258–275.

18. Bull M., Mauchan A., Wilson L. Toll-Road PPPs: Identifying, Mitigating and Managing Traffic Risk [Электрон. ресурс] // Официальный интернет-сайт World Bank Group Public Private

Infrastructure Advisory Facility and The Global Infrastructure Facility (PIIP). Режим доступа: <https://ppiaf.org/documents/5348/download>. (Дата обращения: 03.04.2020).

19. Рекомендации по реализации проектов государственно-частного партнерства. Лучшие практики [Электрон. ресурс] // Официальный интернет-сайт министерство экономического развития Российской Федерации. Режим доступа: https://www.economy.gov.ru/material/departments/d18/gosudarstvenno_chastnoe_partnerstvo/metodicheskoe_i_informacionnoe_soprovozhdenie_sfery_gosudarstvenno_chastnogo_partnerstva/rekomendacii_po_realizacii_proektov_gosudarstvenno_chastnogo_partnerstva_luchshie_praktiki_2018.html (Дата обращения: 03.04.2021).

20. Годовой отчет открытого акционерного общества «Западный скоростной диаметр» за 2014 год [Электрон. ресурс] // Официальный интернет-сайт акционерного общества «Западный скоростной диаметр». Режим доступа: <https://whsd.ru/year>. (Дата обращения: 03.04.2021).

21. Годовой отчет открытого акционерного общества «Западный скоростной диаметр» за 2015 год [Электрон. ресурс] // Официальный ин-

тернет-сайт акционерного общества «Западный скоростной диаметр». Режим доступа: <https://whsd.ru/year>. (Дата обращения: 03.04.2021).

22. Годовой отчет открытого акционерного общества «Западный скоростной диаметр» за 2016 год [Электрон. ресурс] // Официальный интернет-сайт акционерного общества «Западный скоростной диаметр». Режим доступа: <https://whsd.ru/year>. (Дата обращения: 03.04.2021).

23. Годовой отчет открытого акционерного общества «Западный скоростной диаметр» за 2017 год [Электрон. ресурс] // Официальный интернет-сайт акционерного общества «Западный скоростной диаметр». Режим доступа: <https://whsd.ru/year>. (Дата обращения: 03.04.2021).

24. Годовой отчет открытого акционерного общества «Западный скоростной диаметр» за 2018 год [Электрон. ресурс] // Официальный интернет-сайт акционерного общества «Западный скоростной диаметр». Режим доступа: <https://whsd.ru/year>. (Дата обращения: 03.04.2021).

25. Годовой отчет открытого акционерного общества «Западный скоростной диаметр» за 2019 год [Электрон. ресурс] // Официальный интернет-сайт акционерного общества «Западный скоростной диаметр». Режим доступа: <https://whsd.ru/year>. (Дата обращения: 03.04.2021).

References

1. Markovskaya Ye.I. Mekhanizmy gosudarstvenno-chastnogo partnerstva. Teoriya i praktika: uchebnik i praktikum dlya vuzov = Mechanisms of public-private partnership. Theory and practice: textbook and workshop for universities. Moscow: Yurayt; 2019. 491 p. (In Russ.)

2. Maslova S.V. Key risks in public-private partnership projects in the road sector and effective management strategies. Sbornik tezisev dokladov III yezhegodnoy nauchnoy konferentsii «GCHP v sfere transporta: modeli i opyt - 2017» = Collection of abstracts of the III annual scientific conference "PPP in the field of transport: models and experience - 2017". 2017: 36-40. (In Russ.)

3. Maslova S.V. International transport projects of public-private partnership as a means of achieving sustainable development goals and national development goals of the Russian Federation. Sbornik tezisev dokladov IV yezhegodnoy nauchnoy konferentsii «Gosudarstvenno-chastnoye partnerstvo v sfere transporta: modeli i opyt» = Collection of abstracts of the IV annual scientific conference "Public-private partnership in the field of transport: models and experience". 2018: 31-36. (In Russ.)

4. Maslova S.V., Abdulzhamalov R.A., Bortnikov N.A., Shibarov A.A. Public-private partnership in the context of national projects of Russia. Sbornik tezisev dokladov V yezhegodnoy nauchnoy konferentsii «Gosudarstvenno-chastnoye partnerstvo v sfere transporta: modeli i opyt» = Collection

of abstracts of the V annual scientific conference "Public-private partnership in the field of transport: models and experience". 2019: 5-9. (In Russ.)

5. Kotarev S.N., Kotareva O.V. Modern trends in the development of public-private partnership in the field of transport. Uspekhi sovremennoy nauki i obrazovaniya = Success of modern science and education. 2017; 8; 2: 100 – 103. (In Russ.)

6. Buzayev V.V., Sergeyeva N.Yu. Mechanisms for financing projects for the construction of transport infrastructure in the Russian Federation and ways to improve them in modern conditions. Vestnik fakul'teta upravleniya SPbGEU = Bulletin of the Faculty of Management of St. Petersburg State University of Economics. 2017; 2: 4-10. (In Russ.)

7. Aleshina I.A., Gerashchenkova T.M. An effective mechanism for implementing projects for the development of the region's transport infrastructure. Izvestiya TulGU. Ekonomicheskiye i yuridicheskiye nauki = Izvestiya TulGU. Economic and legal sciences. 2016; 4(1): 12-20. (In Russ.)

8. Shevelkina K.L. Finansirovaniye transportnoy infrastruktury na osnove gosudarstvenno-chastnogo partnerstva: dissertatsiya kandidata ekonomicheskikh nauk: 08.00.10 = Financing of transport infrastructure on the basis of public-private partnership: dissertation of the candidate of economic sciences: 08.00.10. Moscow: Financial University under the Government of the Russian Federation; 2015. (In Russ.)

9. White Book of the State Company "Avtodor" [Internet]. Official website of Avtodor Invest. Available from: <http://www.avtodor-invest.com/news/WhiteBook/>. (cited 02.04.2021). (In Russ.)
10. Delmon D. Gosudarstvenno-chastnoye partnorstv infrastrukture prakticheskoye rukovodstvo dlya organov gosudarstvennoy vlasti = Public-Private Partnerships Infrastructure A Practical Guide for Public Authorities. Moscow: TheWorldBank; 2010. 154 p. (In Russ.)
11. Sil'yanov V.V., Domke E.R. Transportno-ekspluatatsionnyye kachestva avtomobil'nykh dorog i gorodskikh ulits = Transport and operational qualities of highways and city streets. Moscow: Academy; 2008. 352 p. (In Russ.)
12. Investment projects of the State company "Avtodor" [Internet]. Official website of Avtodor Invest LLC. Available from: <http://www.avtodor-invest.com/news/WhiteBook/>. (cited 02.04.2021). (In Russ.)
13. PPP Agreement [Internet]. Official website of the operator LLC "Highway of the Northern Capital". Available from: <https://nch-spb.com/company/agreement/>. (cited 25.03.2021). (In Russ.)
14. Live cameras. Northern section of the WHSD. The main course in front of the Ring Road (North) towards the Ring Road [Internet]. Official website of the operator LLC "Highway of the Northern Capital". Available from: <https://nch-spb.com/travel/cameras/>. (cited 20.10.2020). (In Russ.)
15. Talavirya A.YU., Laskin M.B. Simulation modeling of the work of the toll collection point on the main course of the intracity toll road. Nauchno-prakticheskiy zhurnal "Informatizatsiya i svyaz" = Scientific and practical journal "Informatization and Communication". 2020; 5: 67-77. (In Russ.)
16. Skellam J.G. The frequency distribution of the difference between two Poisson variates belonging to different populations. Journal of the Royal Statistical Society. 1946; 109(3): 296.
17. Laskin M.B., Svistunova A.S., Talavirya A.Yu. Estimation of the daily traffic intensity of the toll station at the exit of the intracity toll road. Sistemnyy analiz v proyektirovanii i upravlenii. Sbornik nauchnykh trudov XXIV Mezhdunarodnoy Nauchno-prakticheskoy konferentsii = System analysis in design and management. Collection of scientific papers of the XXIV International Scientific and Practical Conference. (October 13 - 14, 2020, St. Petersburg). Ed. V.N. Kozlova, A.N. Firsova. Saint Petersburg: POLITECH-PRESS; 2020. 2: 258-275. (In Russ.)
18. Bull M., Mauchan A., Wilson L. Toll-Road PPPs: Identifying, Mitigating and Managing Traffic Risk [Internet]. Ofitsial'nyy internet-sayt World Bank Group Public Private Infrastructure Advisory Facility and The Global Infrastructure Facility (PIPF). Available from: <https://ppiaf.org/documents/5348/download>. (cited 03.04.2020).
19. Recommendations for the implementation of public-private partnership projects. Best Practices [Internet]. Official website of the Ministry of Economic Development of the Russian Federation. Available from: https://www.economy.gov.ru/material/departments/d18/gosudarstvenno_chastnoe_partnerstvo/metodicheskoe_i_informacionnoe_soprovozhdenie_sfery_gosudarstvenno_chastnogo_partnerstva/rekomendacii_po_realizacii_proektov_gosudarstvenno_chastnogo_partnerstva_luchshie_praktiki_2018.html (cited 03.04.2021). (In Russ.)
20. Godovoy otchet otkrytogo aktsionernogo obshchestva «Zapadnyy skorostnoy diametr» za 2014 god Annual report of the open joint stock company "Western High-Speed Diameter" for 2014 [Internet]. Official website of the Joint Stock Company "Western High-Speed Diameter". Available from: <https://whsd.ru/year> (cited 03.04.2021). (In Russ.)
21. Godovoy otchet otkrytogo aktsionernogo obshchestva «Zapadnyy skorostnoy diametr» za 2015 god = Annual report of the open joint stock company "Western High-Speed Diameter" for 2015 [Internet]. Official website of the Joint Stock Company "Western High-Speed Diameter". Available from: <https://whsd.ru/year> (cited 03.04.2021). (In Russ.)
22. Godovoy otchet otkrytogo aktsionernogo obshchestva «Zapadnyy skorostnoy diametr» za 2016 god = Annual report of the open joint-stock company "Western High-Speed Diameter" for 2016 [Internet]. Official website of the Joint Stock Company "Western High-Speed Diameter". Available from: <https://whsd.ru/year> (cited 03.04.2021). (In Russ.)
23. Godovoy otchet otkrytogo aktsionernogo obshchestva «Zapadnyy skorostnoy diametr» za 2017 god = Annual report of the open joint-stock company "Western High-Speed Diameter" for 2017 [Internet]. Official website of the Joint Stock Company "Western High-Speed Diameter". Available from: <https://whsd.ru/year> (cited 03.04.2021). (In Russ.)
24. Godovoy otchet otkrytogo aktsionernogo obshchestva «Zapadnyy skorostnoy diametr» za 2018 god = Annual report of the open joint-stock company "Western High-Speed Diameter" for 2018 [Internet]. Official website of the Joint Stock Company "Western High-Speed Diameter". Available from: <https://whsd.ru/year> (cited 03.04.2021). (In Russ.)
25. Godovoy otchet otkrytogo aktsionernogo obshchestva «Zapadnyy skorostnoy diametr» za 2019 god = Annual report of the open joint-stock company "Western High-Speed Diameter" for 2019 [Internet]. Official website of the Joint Stock Company "Western High-Speed Diameter". Available from: <https://whsd.ru/year> (cited 03.04.2021). (In Russ.)

Сведения об авторах

Александр Юрьевич Талавирия

Аспирант

Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого, Россия, Санкт-
Петербург

Эл. почта: a.talavirya@yandex.ru

Михаил Борисович Ласкин

К.ф.-м.н., доцент

Санкт-Петербургский Федеральный
Исследовательский Центр Российской Академии
Наук, Россия, Санкт-Петербург

Эл. почта: laskinmb@yahoo.com

Information about the author

Alexander U. Talavirya

Postgraduate

St. Petersburg Polytechnic University named after
Peter the Great, St. Petersburg, Russia

E-mail: a.talavirya@yandex.ru

Mikhail B. Laskin

Cand. Sci. (Physics and Mathematics),

Associate Professor

St. Petersburg Federal Research Center of the
Russian Academy of Sciences,

St. Petersburg, Russia

E-mail: laskinmb@yahoo.com