

А.А. Тестешев, Т.Г. Микеладзе

Тюменский индустриальный университет (ТИУ), Тюмень, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ НА УЛИЦАХ С НЕРЕГУЛЯРНЫМ ДВИЖЕНИЕМ МЕТОДОМ ДИСТАНЦИОННОГО СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА

Экстенсивное развитие улично-дорожных сетей не соответствует темпам роста транспортной составляющей крупных городов, что приводит к трансформации назначения и категоричности улиц и дорог, невозможности безопасного перемещения с разрешенной скоростью и появлению заторных явлений. Повышение эффективности стратегических решений при развитии транспортной системы городов невозможно без репрезентативной информации о параметрах транспортного потока, получение которых связано с высокими ресурсными, временными и трудовыми затратами. Одним из решений представленной проблемы может являться применение метода дистанционного спутникового мониторинга, который базируется на сборе удаленной информации с онлайн-снимка с дальнейшей его дешифровкой в параметры транспортного потока. Базируясь на теории транспортных потоков, данный метод справедлив исключительно для магистральных улиц со значительным и регулярным движением, что вносит ограничения по дистанционному мониторингу объектов городской транспортной инфраструктуры.

Объектом исследования статьи является оценка возможности удаленного мониторинга транспортных потоков на улицах, не входящих в область определения традиционной методики (имеющих нерегулярное движение), позволяющая дополнить существующие методы дистанционного изучения транспортной среды городов.

В рамках настоящей работы: изучены транспортные условия, влияющие на потребность в перемещениях жителей городов; доказана актуальность исследования по определению интенсивности движения на улицах с нерегулярным движением; изучено количественное и качественное распределение дорожных и транспортных условий, объектов притяжения участников дорожного движения на различных категориях улиц; выявлен перечень значимых факторов, к числу которых относятся: количество и этажность жилых домов, вместимость и мощность учреждений и зданий, наделенных общественной функцией. Также предложена формализованная математическая модель, описывающая корреляцию интенсивности на улицах с нерегулярным движением от значимых факторов; представлены результаты натурных измерений интенсивности движения в макро-, мезо- и микровременном масштабе для формулирования закона распределения интенсивности движения в суточном цикле.

Ключевые слова: транспортный поток, интенсивность движения, дистанционный мониторинг, улично-дорожная сеть, нерегулярное движение, загруженность улиц, спутниковые снимки.

A.A. Testeshev, T.G. Mikeladze

Tyumen industrial University, Tyumen, Russian Federation

INVESTIGATION OF TRAFFIC FLOWS ON THE STREETS WITH IRREGULAR TRAFFIC BY REMOTE SATELLITE MONITORING

Extensive development of street and road networks does not correspond to the growth rate of the transport component in large cities, which leads to the transformation of the purpose and categories of streets and roads, the impossibility to drive safely with the permitted speed and the appearance of traffic jams. Improvement of the effectiveness of strategic decisions related to the development of the transport system in the cities is impossible without having representative information about the parameters of the transport flow; obtaining of this information requires high resource, time and labor costs. One of the solutions to this problem can be the use of remote satellite monitoring, which is based on the collection of remote information from the online image with its further decryption into the parameters of the traffic flow. Based on the theory of traffic flows, this method can be used only for the main streets with significant and regular traffic, which imposes restrictions on applying remote monitoring of urban transport infrastructure.

The object of the research was to assess the possibility of remote monitoring of traffic flows on the streets that are not included in the definition of traditional methods (those with irregular traffic), which allows to supplement the existing methods of remote study of transport environment of the cities.

In the framework of this work the following tasks were performed: transport conditions affecting the need for transportation of urban residents were studied; the relevance of the study to determine the intensity of traffic on streets with irregular traffic was proved; the quantitative and qualitative distribution of road and transport conditions, objects of attraction

of road users in the streets of different categories was studied; a list of significant factors was identified, including the number buildings and the number of floors of residential buildings, capacity of institutions and public buildings; a formalized mathematical model describing correlation between traffic intensity on the streets with irregular traffic and significant factors is offered; the results of full-scale measurements of the intensity of traffic in macro, meso and micro timescales for determination of the law of distribution of the intensity of traffic in a daily cycle are presented.

Keywords: traffic flow, traffic intensity, remote monitoring, road network, irregular traffic, traffic load, satellite images.

В деятельности по совершенствованию городской транспортной инфраструктуры знание количественных характеристик транспортных потоков на ней является неотъемлемой частью стратегического и оперативного управления функционированием современных городов. Для принятия проектных и строительных решений необходимо наличие значительного объема количественной и качественной информации о первичных параметрах транспортного потока не только для конкретной улицы, но и для транспортной сети в целом.

Для исследования интенсивности и состава движения в крупнейших и тяготеющих к ним городах может быть использован метод дистанционного спутникового мониторинга транспортных потоков на улицах с регулярным движением [1], который является одним из наименее ресурсно затратных способов получения информации на сетевых транспортных объектах [2]. Суть метода заключается в дешифровке информации с бесплатных картографических онлайн-ресурсов и в ее дальнейшей интерпретации посредством математического аппарата [3], базирующегося на теории транспортных потоков [4–6]. Данные преобразования позволяют получить аппаратными средствами искомые характеристики транспортных потоков: интенсивность движения и ее производные [7]. Представленная методика послужила основой для разработки программного продукта для определения характеристик транспортного потока [8], позволяющего добиться снижения ресурсных затрат по сравнению с традиционными методами мониторинга в 5–8 раз [9].

При апробации вышеописанной методики были определены области ее рационального применения, исходя из условия, что значения плотности потока, определяемые по спутниковому снимку, должны быть не менее 20 авт./км (рис. 1). При использовании значений плотности ниже указанного предела рассчитываемые по ней значения интенсивности движения характеризуются существенным разбросом и нестабильностью результатов в доверительном интервале точности [10] и не могут быть применены в практической деятельности субъектов дорожного хозяйства.

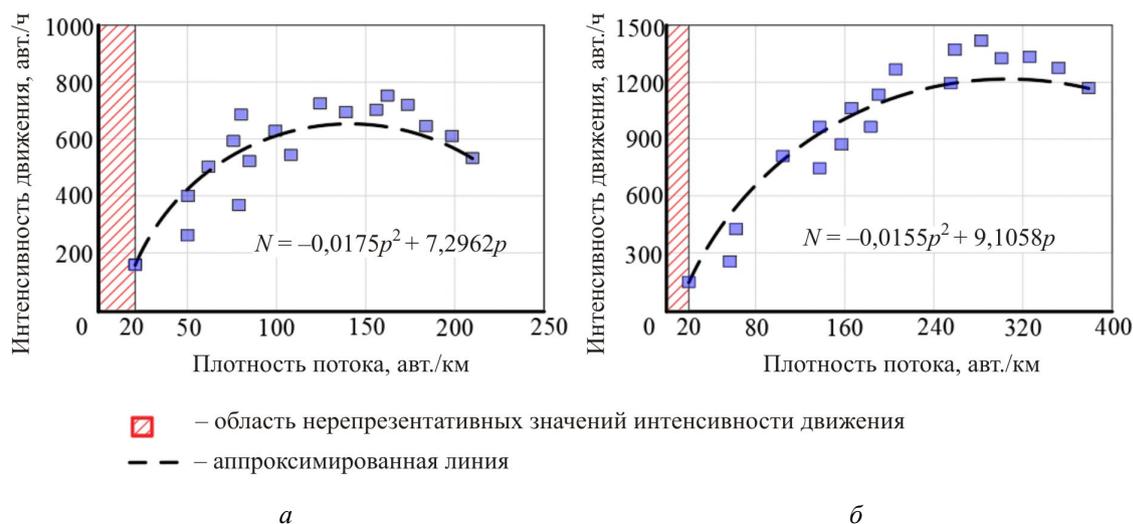


Рис. 1. Графики зависимости интенсивности движения от плотности транспортного потока (фрагмент): *a* – г. Екатеринбург, Площадь 1905 г. (2 полосы движения); *б* – г. Санкт-Петербург, Невский проспект (3 полосы движения)

В то же время в городской инфраструктуре присутствуют объекты с плотностью потока, на спутниковом снимке, ниже порогового показателя (улицы в зонах жилой застройки, улицы в общественно-деловых и торговых зонах и другие [11]) и меньшим транспортным спросом, требующие количественной и качественной идентификации характеристик транспортного потока [12]. На данных улицах плотность потока, на спутниковом снимке, может достигать нулевого значения, что характеризует нулевую интенсивность, а по факту параметр интенсивности может быть весьма высок, исходя из этого, использование ранее разработанного метода не представляется возможным на улицах, имеющих нерегулярное движение.

Так, статистический анализ спутниковых снимков с онлайн-ресурсов показал, что в Российской Федерации на 01.12.2017 г. протяженность улиц и дорог с плотностью транспортного потока ниже указанной достигает 27,4 % от общей протяженности улично-дорожной сети городов [13]. Поскольку объекты с малыми объемами и нерегулярным движением занимают существенный объем транспортной инфраструктуры современных городов и альтернативы их исследования в рамках сетевого взаимодействия в настоящее время не существует, разработка методики определения интенсивности движения на улицах и дорогах с нерегулярным движением является актуальной задачей.

В ходе изучения суточных закономерностей изменения транспортного спроса была выполнена сравнительная оценка количественного влияния на интенсивность различных факторов, на улицах как с регулярным движением (магистральные улицы), так и с нерегулярным движением (улицы местного значения). Данные, приведенные в таблице, получены авторами в ходе мониторинга улично-дорожных сетей 28 крупных и крупнейших городов Российской Федерации общей протяженностью 3000 км, включавших улицы с регулярным и нерегулярным движением транспорта.

Частота фиксации факторов влияющих на интенсивность движения (фрагмент)

Факторы, влияющие на интенсивность движения	Характеристика	Ед. изм.	Протяженность или количество элементов на 100 км улиц	
			магистральные	местного значения
Состояние дорожного покрытия	разрушения на покрытии	м ²	100	2100
	деформации на покрытии	м ²	3000	5000
Техническое состояние улицы	искусственное освещение	км	100	70
	дорожная разметка	км	95	55
	ограждения	км	85	60
	дорожные знаки	шт.	400	380
Наличие жилых домов	многоэтажные (9 и более)	%	65	54
	среднеэтажные (5–8)	%	20	23
	малоэтажные (1–4)	%	15	23
Обучающие учреждения	детские сады	шт.	4	14
	школьные учреждения	шт.	3	10
	дома культуры (дома творчества, детские школы искусств)	шт.	5	14
	спортивные секции	шт.	5	13
Здания, наделенные общественной функцией	продуктовые магазины	шт.	6	74
	торговые центры	шт.	10	4
	почтовые отделения	шт.	2	23
Улицы-дублиры	наличие улиц-дублеров	шт.	15	33
Светофорное регулирование	наличие светофорного регулирования	шт.	68	31
Количество полос (в 1 направлении)	2 и более	км	100	7
	1	км	0	93
Состав потока	грузовые автомобили	%	5	1,9
	общественный транспорт	%	10	15

Окончание таблицы

Факторы, влияющие на интенсивность движения	Характеристика	Ед. изм.	Протяженность или количество элементов на 100 км улиц	
			магистральные	местного значения
Время нахождения в расчетных состояниях покрытия	сухое покрытие	ч	6084	5122
	мокрое покрытие	ч	2496	3120
	снежный накат	ч	147	368
	стекловидный лед	ч	60	150
Районирование	промышленная	%	24	2
	общественно-деловая	%	5	70
	зона рекреаций	%	12	21
	селитебная	%	59	9
Режим движения	маятниковое движение	%	31	87
	постоянный спрос	%	69	13

В результате синергетического взаимодействия вышеперечисленные условия формируют различную степень привлекательности маршрутов для участников дорожного движения, что в конечном итоге и определяет плотность и интенсивность движения на данном маршруте.

В рамках разработки многофакторной модели транспортного спроса из-за невозможности учета всех особенностей возникла необходимость определения наиболее значимых факторов.

Малая развитость улично-дорожной сети многих крупных городов [14] приводит к тому, что пользователи, не имея альтернативных путей проезда, вынуждены использовать единственно доступный маршрут к центрам притяжения вне зависимости от состояния дорожного покрытия [15], оборудования и обустройства улиц. В связи с этим влиянием на интенсивность движения состояния дорожного покрытия, технического состояния улицы и временем нахождения покрытия в различных расчетных состояниях было решено пренебречь.

В ходе исследования фактора загруженности магистральных улиц было установлено, что параллельные им улицы (дублеры) в час пик также загружены и смена маршрута может привести к лишь незначительному изменению времени пребывания в пути. Для улиц местного значения в условиях отсутствия возможности выбора альтернативного маршрута фактор влияния улиц-дублеров при разработке математической модели может быть не учтен.

Дифференцируя на улицах местного значения транспортный поток по составу, установили, что количество грузовых автомобилей и общественного транспорта в потоке имеет низкое процентное значение, что позволяет также исключить данный показатель из числа параметров, существенно влияющих на интенсивность движения.

При изучении влияния количества и этажности жилых домов, административных зданий и обучающих учреждений было отмечено, что прослеживается устойчивая корреляция между числом объектов притяжения и интенсивностью движения, в связи с чем необходимо более детальное исследование данных факторов.

Количественное преобладание и отсутствие дифференциации интенсивности движения от количества полос позволило принять для дальнейшего исследования улицы и дороги, имеющие две полосы движения.

Таким образом, форматизированная модель зависимости интенсивности движения на улицах с нерегулярным движением от выявленных значимых факторов примет вид

$$Nra = f(J, O, K),$$

где J – наличие жилых домов; O – наличие обучающих учреждений; K – наличие зданий с общественной функцией (локации удовлетворяющие потребность людей в труде и быте: продуктовые магазины, торговые центры, почтовые отделения и т.д.); r – режим движения; a – районирование.

Для исследования законов фактического распределения движения в течение суток были начаты замеры интенсивности транспортных потоков методом дистанционного видеонаблюдения с дорожных камер в 15 крупнейших городах Российской Федерации. Нерегулярность движения не позволяет использовать традиционный временной масштаб измерения (автомобили в час) и требует перехода на микроинтервалы (5, 15 и 30 мин) для возможности фиксации продолжительности «нулевого» спроса в течение суточного цикла (рис. 2).

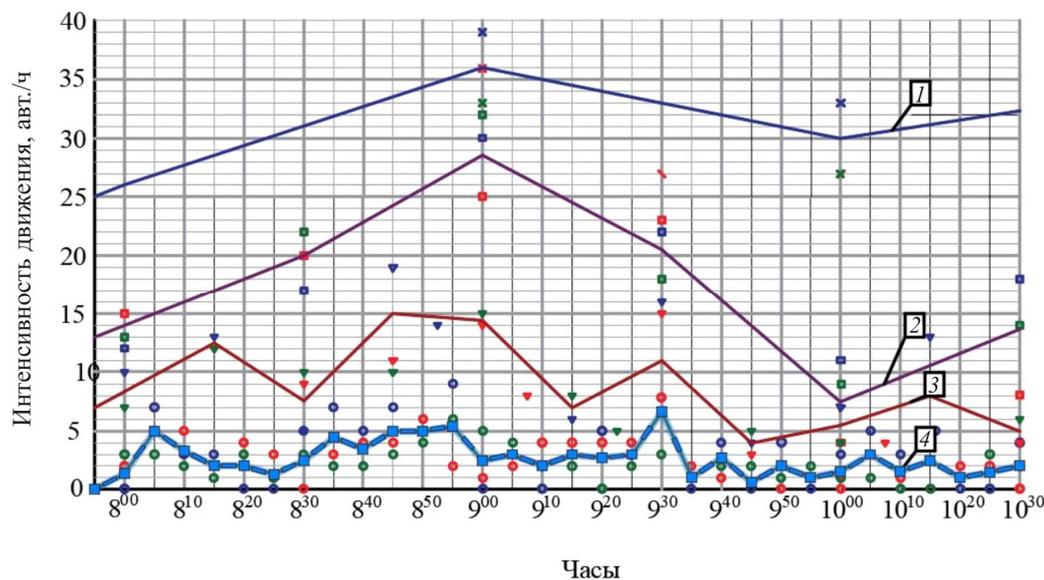


Рис. 2. Графики зависимости интенсивности движения от времени суток (фрагмент)

Наиболее информативными и целесообразными с позиций технико-экономических затрат были признаны наблюдения в 15-минутных интервалах, поскольку расхождение между продолжительностью «нулевого» транспортного спроса между 15- и 5-минутными интервалами не превысили 15 %.

Таким образом, в ходе настоящего этапа исследования можно сделать следующие выводы:

1. Неточные закономерности изменения интенсивности на улицах с регулярным и нерегулярным движением не позволяют распространить на последние существующий дешифровочный аппарат, что в условиях исследования городских транспортных систем как сетевых объектов обуславливает актуальность исследования.

2. Сравнительная оценка количественного и качественного влияния на интенсивность различных параметров городской инфраструктуры позволила обосновать значимые факторы и разработать модель транспортного спроса на улицах с нерегулярным движением.

3. С учетом специфических изменений интенсивности движения на улицах с нерегулярным движением был разработан режим мониторинга, позволяющий зафиксировать продолжительность «нулевого» транспортного спроса с допустимой погрешностью.

В продолжение исследования планируется сформировать доверительный объем информации о характеристиках транспортного потока и разработать многофакторные математические зависимости по определению интенсивности движения на улицах с нерегулярным транспортным спросом на основе спутникового наблюдения.

Список литературы

1. Testeshev A.A., Timohovetz V.D., Mikeladze T.G. 2018 Development of multiparameter equations for satellite monitoring analysis of traffic flow MATEC Web of Conferences vol. 143 04009. – URL: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201814304009>.

2. Тимоховец В.Д., Сысуев Д.А. Выбор оптимального метода мониторинга транспортных потоков в условиях города // Новые технологии – нефтегазовому региону. – Тюмень, 2018. – Т. 5. – С. 210–211.
3. Новиков Ф.А. Дискретная математика. – 3-е изд., СПб.: Питер, 2017. – 496 с.
4. Сильянов В.В. Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации движения. – М.: Транспорт, 1977. – 303 с.
5. Горев А.Э. Теория транспортных процессов и систем: учебник для среднего профессионального образования. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Юрайт, 2017. – 217 с. – (Профессиональное образование.)
6. Хейт Ф. Математическая теория транспортных потоков. – М.: Мир, 1966.
7. Хомяк Я.В. Организация дорожного движения: учебник для вузов. – Киев: Высшая школа. Общий издательский дом, 1986. – 271 с.
8. Дрю Д. Теория транспортных потоков и управление ими. – М.: Транспорт, 1972. – 424 с.
9. Пат. 2019611026 Российская Федерация. Определение интенсивности транспортных потоков на основе дистанционного спутникового мониторинга: № 2018665096: заявл. 24.12.2018; опубл. 18.01.2019 / Лощина И.Е., Тестешев А.А., Тимоховец В.Д.; Патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет» (ТИУ).
10. Асеев Г.Г., Абрамов О.М., Ситников Д.Э. Дискретная математика: учеб. пособие. – Ростов н/Д: Феникс, 2003. – 145 с.
11. Проект функционально-планировочного жилого образования: методические рекомендации по выполнению курсового проекта для студентов, обучающихся по профилю «Городское строительство и хозяйство» направления 08.03.01 «Строительство» очной и заочной форм обучения / сост. Кузьмина Т.В; Тюмен. индустр. ун-т. – Тюмень: Изд-во ООО «Международный институт», 2018. – 35 с.
12. Трофименко Ю.В., Якимов М.Р. Транспортное планирование: формирование эффективных транспортных систем крупных городов: монография. – М.: Логос, 2013. – 464 с.
13. Тестешев А.А., Микеладзе Т.Г. Исследование закономерностей движения на улицах и дорогах с нерегулярным движением г. Тюмени // Организация и безопасность дорожного движения: XII Нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием (14 марта 2019 г.) – Тюмень, 2019. – С. 103–106.
14. Глазычев В.Л. Урбанистика. – М.: Европа, 2008. – 220 с.
15. Самодурова Т.В. Метеорологическое обеспечение зимнего содержания автомобильных дорог / Ассоциация «РАДОР». – М.: ТИМР, 2003.

References

1. Testeshev A.A., Timohovetz V.D., Mikeladze T.G. 2018 Development of multiparameter equations for satellite monitoring analysis of traffic flow MATEC Web of Conferences vol. 143 04009 (<https://doi.org/10.1051/mateconf/201814304009>).
2. Timokhovetz V.D., Sysuev D.A. Vybora optimal'nogo metoda monitoringa transportnykh potokov v usloviakh goroda [Choosing the optimal method for monitoring traffic flows in a city] Tyumen, Novye tekhnologii – neftegazovomu region, 2018, vol. 5, pp. 210-211.
3. Novikov F.A. Diskretnaia matematika [Discrete Math] – Saint Petersburg, 3 ed., Piter, 2017, 496 p.
4. Sil'ianov V.V. Teoriia transportnykh potokov v proektirovanii dorog i organizatsii dvizheniia [Theory of traffic flows in road design and traffic management]. Moscow, Transport, 1977, 303 p.
5. Gorev A.E. Teoriia transportnykh protsessov i sistem: uchebnik dlia srednego professional'nogo obrazovaniia [Theory of transport processes and systems: textbook for secondary vocational education]. 2 ed. Moscow, Urait, 2017, 217 p.
6. Kheit F. Matematicheskaia teoriia transportnykh potokov [Mathematical theory of transport flows]. Moscow, Mir, 1966, 288 p.
7. Khomiak Ia.V. Organizatsiia dorozhnogo dvizheniia: uchebnik dlia VUZov [Traffic management: textbook for Universities], Kiev, Higher school. General publishing house, 1986, 271 p.
8. Driu D. Teoriia transportnykh potokov i upravlenie imi [Transport flow theory and management]. Moscow: Transport, 1972, 424 p.

9. Loshchinina I.E., Testeshev A.A., Timokhovets V.D. Pat. 2019611026 Rossiiskaia Federatsiia, Opredelenie intensivnosti transportnykh potokov na osnove distantsionnogo sputnikovogo monitoring [The definition of intensity of transport streams on the basis of the satellite remote monitoring] №2018665096: statement 24.12.2018, published 18.01.2019, Patentee Federal State budget institution of higher education «Tyumen industrial University» (TIU).

10. Aseev G.G., Abramov O.M., Sitnikov D.E. Diskretnaia matematika Uchebnoe posobie [Discrete mathematics Tutorial]. Rostov-on-Don, Feniks, 2003, 145 p.

11. Kuz'mina T.V. Proekt funktsional'no-planirovochnogo zhilogo obrazovaniia: metodicheskie rekomendatsii po vypolneniiu kursovogo proekta dlia studentov, obuchaiushchikhsia po profilu «Gorodskoe stroitel'stvo i khoziaistvo» napravleniia 08.03.01 Stroitel'stvo ochnoi i zaочноi form obucheniia [The project of functional and planning residential education: guidelines for the implementation of the course project for students enrolled in the profile "Urban construction and economy" direction 08.03.01 construction of full-time and correspondence forms of education]. Tyumen, Tyumen industrial University, International Institute, 2018, 35 p.

12. Trofimenko Iu. V. Transportnoe planirovanie: formirovanie effektivnykh transportnykh sistem krupnykh gorodov: monografiia [Transport planning: formation of effective transport systems of large cities: monograph]. Moscow, Logos, 2013, 464 p.

13. Testeshev A. A. Mikeladze T. G Issledovanie zakonomernosti dvizheniia na ulitsakh i dorogakh s neregularnym dvizheniem g. Tiiumeni [Study patterns of traffic on streets and roads with occasional traffic in the city of Tyumen]. Tyumen, Organization and safety of road traffic.: XII national scientific and practical conference with international participation, 2019, pp. 103-106

14. Glazychev V.L. Urbanistika [Urbanistics]. Moscow: Europe, 2008, 220 p.

15. Samodurova T.V. Meteorologicheskoe obespechenie zimnego soderzhaniia avtomobil'nykh dorog [Meteorological maintenance of winter roads]. Moscow, RADOR, 2003. 183 p.

Получено 30.09.2019

Об авторах

Тестешев Александр Александрович (Тюмень, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобильные дороги и аэродромы» Тюменского индустриального университета (625000, г. Тюмень, ул. Луначарского, 2, e-mail: testeshvaa@tyuiu.ru).

Микеладзе Татьяна Григорьевна (Тюмень, Россия) – магистрант, ассистент-стажер кафедры «Автомобильных дорог и аэродромов» Тюменского индустриального университета (625000, г. Тюмень, ул. Луначарского, 2, e-mail: mikeladzetg@tyuiu.ru).

About the authors

Alexander A. Testeshev (Tyumen, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Roads and Airfields, Tyumen Industrial University (2 Lunacharskiy st., Tyumen, 625000, Russian Federation, e-mail: testeshvaa@tyuiu.ru).

Tatyana G. Mikeladze (Tyumen, Russian Federation) – Master's Student, Assistant-Trainee, Department of Roads and Airfields, Tyumen Industrial University (2, Lunacharskiy st., Tyumen, 625000, Russian Federation, e-mail: mikeladzetg@tyuiu.ru).