

ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ ДИСТАНЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

А. А. Тестешев, В. Д. Тимоховец, Т. Г. Бабич
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

DIFFERENTIATION OF THE USE OF REMOTE TRAFFIC RESEARCH METHODS

Alexander A. Testeshev, Vera D. Timohovets, Tatyana G. Babich
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Аннотация. Существующие агломерационные тренды выдвигают новые требования к транспортной инфраструктуре современных городов. Планирование городского развития должно базироваться на репрезентативной информации о дорожном движении. Для снижения ресурсных затрат на сетевое исследование транспортных потоков выбран метод дистанционного зондирования движения по критериям площади и конфигурации улично-дорожной сети урбанизированной территории, предполагающий применение современных спутниковых систем. Наиболее подходящими для данной цели в России являются спутники «Ресурс-П» и «Канопус-В», лучшими за рубежом по соотношению качества съемки и регулярности обновления ресурсов можно назвать The Landsat Program и Maxar (США). Установлена корреляция пространственного разрешения спутниковых снимков и масштаба дешифрируемого изображения с техническими возможностями спутниковых систем; критическое пространственное разрешение в 1/14.8 м/мм достигается при масштабе 1:450. Авторы разработали и рассмотрели на примере 14 городских российских и зарубежных агломераций алгоритм выбора рационального метода дистанционного зонди-

Abstract. The existing urban trends give new demands on the transport infrastructure of modern cities. Urban development planning should be based on representative traffic information. To reduce the resource costs of network research of traffic flows, we chose the method of remote sensing of traffic by criteria of area and configuration of the street-road network of the urbane territory with the use of modern satellite systems. The most suitable satellites for this purpose in Russia are Resurs-P and Kanopus-B, while the best satellites abroad in terms of image quality and regularity of resource updates are The Landsat Programme and Maxar (USA). We set, that the spatial resolution of satellite images and the scale of the image to be interpreted are correlated with the technical capabilities of satellite systems; the critical spatial resolution of 1/14.8 m/mm is achieved at a scale of 1:450. The authors developed an algorithm for selecting a rational method of remote sensing of traffic for different spatial urban structures at micro-, meso- and macro-levels and considered it on the example of 14 urban Russian and foreign agglomerations. The article presents a feasibility study of remote sensing application based on the "cost per unit of accuracy" criterion. Its values ranged from 0.08 to 1393.94 thousand rubles depending

рования движения для различных пространственных городских структур на микро-, мезо- и макроуровнях. Приведено технико-экономическое обоснование применения дистанционного исследования по критерию «стоимость единицы точности». Его значения составили от 0.08 до 1393.94 тыс. руб. в зависимости от выбранного метода мониторинга и площади пространственных структур изучаемых объектов. Приоритетным по стоимости единицы точности оказался метод дистанционного спутникового зондирования. С учетом полученных данных планируется создание программного продукта по автоматизации дешифровочных алгоритмов определения параметров дорожного движения.

Ключевые слова: масштаб съемки, дистанционное зондирование, съемочная система

on the selected monitoring method and the area of spatial structures of the studied objects. The satellite remote sensing method was found to be a priority in terms of cost per unit of accuracy. Taking into account the obtained data, we plan to create a software product for automation of decoding algorithms for determining traffic parameters.

Key words: shooting scale, remote sensing, shooting system

Для цитирования: Тестешев, А. А. Дифференциация применения методов дистанционного исследования дорожного движения / А. А. Тестешев, В. Д. Тимоховец, Т. Г. Бабищ. – DOI 10.31660/2782-232X-2023-4-34-47. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2023. – № 4 (106). – С. 34–47.

For citation: Testeshev, A. A., Timohovets, V. D., & Babich, T. G. (2023). Differentiation of the use of remote traffic research methods. Architecture, Construction, Transport, (4(106)), pp. 34-47. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2023-4-34-47.

Введение

Современный этап развития общества сопровождается таким глобальным пространственным процессом, как урбанизация, приводящим к росту концентрации населения в границах городских территорий. Лидирующие позиции в этом процессе занимают экономически развитые страны мира (без учета стран-государств, имеющих качественные отличия в пространственном развитии в силу территориального расположения), такие как Япония (91.7 %), Объединенные Арабские Эмираты (86.8 %), Австралия (86.1 %), Великобритания (83.7 %), Соединенные Штаты Америки (82.5 %), Франция (80.7 %), Германия (77.4 %), Российская Федерация (74.6 %), Китайская Народная Республика (60.3 %) и др.

Оценка динамики урбанистических и агломерационных процессов, а также их проблема-

тики базировалась на выборке статистических показателей развития территорий ряда крупных городов Российской Федерации и зарубежных стран (таблица 1).

Изучение выполненных исследований по теме городского планирования и развития [1] показало, что на основе качественного анализа тенденций урбанизации территорий прогнозируется дальнейший рост городских агломераций, а авторы [2], исследуя характер сфер человеческой деятельности, приходят к заключению о росте мобильности городского населения, занятого в реальном секторе материально-вещественной экономики.

Количественный анализ представленных данных (таблица 1) позволяет заключить, что темпы прироста численности населения в городах хоть и отличаются незначительными флук-

Таблица 1
Table 1

Динамика численности населения и площадь занимаемых земель городскими территориями
Population dynamics and land area occupied by urban areas

Типовая структура города	Наименование города	Геометрические размеры города*, км	Прирост численности населения, %			Характерные площади, км ²		
			1990–2000	2000–2010	2010–2020	города	района (средняя)	микрорайона
Эллиптическая / прямоугольная	Санкт-Петербург	52 × 28	–2.2	+4.6	+1.0	1 439.0	60.7	0.8
	Новосибирск	28 × 18	–0.0	–2.2	+4.7	502.0	70.3	0.8
	Самара	58 × 8	–5.7	+0.8	–0.7	541.0	48.5	0.8
	Омск	34 × 17	–0.9	+0.4	+0.1	572.0	98.4	0.8
	Уфа	36 × 20	+0.3	–2.7	+5.9	707.0	131.0	0.8
	Пермь	32 × 25	–3.4	–1.8	+6.1	799.0	72.5	0.8
	Красноярск	26 × 13	+0.0	+10.0	+11.0	379.0	36.0	0.8
	Воронеж	40 × 15	+2.0	–2.0	+15.9	596.0	127.0	0.8
	Лондон	50 × 30	+0.4	+1.7	+0.3	1 706.0	60.6	0.8
Радиальная / квадратичная	Москва	30	+1.1	+1.4	+0.9	2 561.0	40.6	0.8
	Екатеринбург	13	–2.09	+6.2	+9.7	495.0	126.0	0.8
	Ростов-на-Дону	11	+0.0	+7.0	+4.3	348.5	85.4	0.8
	Челябинск	13	–2.7	+4.2	+5.6	530.0	75.0	0.8
	Тюмень	16	+9.9	+1.4	+2.9	698.5	126.5	0.8
	Берлин	16	–1.5	–1.7	+0.9	891.0	64.7	0.8
	Пекин	60	+6.4	+4.8	+2.4	16 801.0	304.2	0.8
Треугольная	Волгоград	20–30	+0.2	+2.1	–1.2	859.0	71.5	0.8
	Нижний Новгород	36–50	–3.4	–7.8	+0.0	514.0	94.0	0.8
	Токио	50–60	+2.3	+0.9	–1.5	2 194.0	34.8	0.8
	Нью-Йорк	35–42	+9.4	+2.1	+2.0	1 214.9	148.9	0.8

туациями в силу политических (международные конфликты, миграционные процессы), экономических (санкции, эмбарго, дефолт) и других (эпидемии, пандемии и др.) внешних факторов, в целом демонстрируют положительную динамику изменения демографической ситуации. Для обеспечения качества городской среды как при экстенсивной (рост населения за счет расширения территории), так и при интенсивной (за счет увеличения плотности населения) урбанизации возникает необходимость ужесточить требования к различным сферам жизнедеятельности человека, что обусловлено возможностями транспортной инфраструктуры [2]. От эффективности транспортных систем зависит успешная деятельность социально значимых объектов – медицинских, образовательных, спортивных учреждений, учреждений социального обслуживания, культуры и т. д. Качество транспортного обслуживания

(перемещения товаров, грузов, перевозки пассажиров) оценивается соотношением затрат времени на передвижение и транспортной доступности. Транспорт выполняет интеграционную и коммуникационную роли и обеспечивает полноценное функционирование инфраструктур городского хозяйства.

Рост мобильности населения выдвигает качественно новые требования к улично-дорожной сети города, которая должна быть релевантной запросам и потребностям современного человека.

Объект и методы исследования

В целях формирования комфортной городской среды Минстрой России разработал национальный проект «Жилье и городская среда» [3], реализация которого невозможна без развития транспортной системы. Объектом исследования

являются параметры транспортного потока, количественно характеризующие дорожное движение.

Планирование развития урбанизированных транспортных систем базируется на основе репрезентативной информации о транспортных потоках [4], которая может быть собрана различными методами.

Контактные методы, являясь традиционными и общедоступными, в условиях физического взаимодействия с объектом наблюдения регистрируют показания с помощью наземных средств измерений: детекторов, постов мониторинга, радаров и телеметрии.

Бесконтактные методы, основанные на геоинформационных технологиях, обеспечивают передачу показаний в центры наблюдения дистанционно посредством радиоволн, проводных систем, через спутниковые сигналы и т. п. Процесс съемки может осуществляться в рамках авиационного мониторинга с самолетов, вертолетов, микроавиационных радиоуправляемых аппаратов или космического мониторинга, производимого с пилотируемых орбитальных станций, кораблей многоразового использования, автономных спутниковых съемочных систем и т. п.

Данные, полученные с помощью контактных и бесконтактных методов, могут быть применены для решения различных инженерных задач: проектирования объектов городской инфраструктуры, изучения динамики транспортного спроса, оптимизации маршрутов движения, обеспечения дорожной безопасности и др. В зависимости от масштаба съемки данные могут использоваться на различных уровнях:

- микроуровень – мониторинг условий в отдельных микрорайонах, жилых комплексах, на локальных транспортных объектах местного значения, по площади не превышающих 0.1–0.6 км²;
- мезоуровень – изучение движения на магистральных улицах и городских дорогах транспортных объектов общегородского значения, а также отдельных районов и областей городских территорий, по площади составляющих 0.6–5.6 км²;

- макроуровень – исследование территорий населенных пунктов и улично-дорожной сети города в целом с целью получения представления об общей транспортной ситуации на площадях, превышающих 5.6 км².

Главным недостатком многих методов является трудозатратность, что делает оправданным их использование только на локальных транспортных объектах малой площади и длины: пересечениях, отдельных улицах и т. д. Для изучения движения на всей улично-дорожной сети наиболее целесообразным представляется применение ресурсосберегающих методов. Современный уровень развития информационно-коммуникационных технологий позволяет для исследования транспортных потоков с необходимой точностью измерений в качестве основных использовать дистанционные методы, а контактные применять для тарировки (выборочной проверки и корректировки) результатов.

В настоящее время наибольшее распространение получили методы, например, дистанционное зондирование [5] и спутниковый мониторинг, с помощью которых выполняется ряд функций одновременно.

Дистанционное зондирование Земли представляет собой наблюдение за поверхностью планеты наземными, авиационными и космическими средствами, которые оснащены специальными видами съемочной аппаратуры [6]. Зондирование применяется в различных областях человеческой деятельности и является достаточно сложной системой, которая включает в себя:

- обновление картографических ресурсов (топографических, автодорожных, навигационных и других специальных карт);
- мониторинг состояния окружающей среды с учетом воздействия природных и антропогенных факторов: оценка ущерба лесных пожаров, наблюдение за ледовой обстановкой, оценка влияния сельскохозяйственной деятельности человека и др.;
- мониторинг чрезвычайных ситуаций, связанных с природными и техногенными воздействиями.

С помощью зондирования можно решать и задачи меньшего масштаба: осуществлять строительный контроль (в том числе мониторинг несанкционированных построек), следить за функционированием дорожно-транспортной инфраструктуры и т. д. Однако анализ показал, что чаще всего зондирование применяется в экологическом и природоохранном направлениях, в то время как наблюдение за объектами транспортной инфраструктуры практически не ведется в силу малой изученности его возможностей. Исследования авторов [7, 8] доказывают возможность дистанционного мониторинга урбанизированных транспортных систем, что повышает конкурентоспособность данного метода за счет репрезентативности разработанного дешифровочного аппарата, позволяющего определять первичные и производные характеристики транспортных потоков. Предлагаемая в настоящей работе дифференциация дистанционных методов зондирования базируется на учете тех-

нических возможностей средств наблюдения, соотношенных с экономическими затратами на исследование транспортных сетей различных планировочных конфигураций, размеров и площадей.

Многообразие съемочных систем дистанционного зондирования, их специализаций и возможностей [9] предопределило необходимость изучения принципов работы и характеристик режима съемки (таблица 2).

Разнообразие видов дистанционного зондирования расширяет границы его применения для достижения различных инженерных целей. Наиболее релевантными для исследования транспортных потоков представляются сканерные и лазерные методы с ориентировочной точностью 35 и 65 % соответственно (в силу широкого применения и наличия в большом количестве оборудования для лазерного сканирования).

На сегодняшний момент дистанционное зондирование Земли получило широкое распро-

Таблица 2
Table 2

Характеристики съемочных систем дистанционного зондирования
Characteristics of remote sensing systems

Вид, год начала применения Технические характеристики	Фотографические (1858 г.)	Телевизионные (1960 г.)	На основе приборов с зарядовой связью (1970 г.)	Сканерные (1957 г.)	Радиолокационные (1959 г.)	Лазерные (1986 г.)
Спектральная разрешающая способность, мкм	0.4–0.9	0.4–0.9	0.6–0.9	3.0–14.0	0.8–30.0	0.3–0.95
Линейная разрешающая способность, м	до 8	до 20	до 20	до 1	до 10	до 1
Фотограмметрическая точность*	Максимальная	Минимальная	Минимальная	Максимальная	Минимальная	Максимальная
Фотометрическая точность**	Стабильная	Стабильная	Минимальная	Стабильная	Переменная, зависит от внешних факторов	Стабильная
Масштаб съемки	1:7 000	1:500 000	от 1:250 000 до 1:50 000	1:500 000	от 1:400 000 до 1:180 000	до 1:500
Высота съемки, км	435	1–917	250	717	от 250	от 0.5

* Фотограмметрическая точность характеризует степень искажения снимка, максимальному значению соответствует предел погрешности измерения в 25 % (относимый к случайной погрешности)

** Фотометрическая точность характеризует точность передачи пропорций яркостей снимаемых объектов по полю изображения

Таблица 3
Table 3

Технические характеристики наиболее распространенных и точных спутников
Technical characteristics of the most common and accurate satellites

Страна	Вид	Спутник	Краткие характеристики		Стоимость съемки по видам, у.е.		
			Наименование	Значение	пан-хроматическая	синтезированная	мультиспектральная
РФ	Сканерный	Ресурс-П	Пространственное разрешение	до 1 м	5.68	5.68	5.68
			Ширина полосы съемки	97 км			
	Матрично-сканерный	Канопус-В	Пространственное разрешение	2.5 м	0.8	0.8	0.8
			Ширина полосы съемки	23 км			
США	Телевизионные и сканерные	The Landsat	Пространственное разрешение	30 м	18	32.4	56.4
			Ширина полосы съемки	до 185 км			
			Количество снимков в день	700 шт.			
	Сканерный	Maxar	Пространственное разрешение	0.15 м	61.2	65.4	67.2
			Количество полос изображения	4 шт.			
			Ширина полосы съемки	16.4 км			
			Средняя позиционная точность снимков	менее 5 м			
	Сканерный	Spot	Ширина полосы съемки	200 км	14.39	15.3	19.62
			Пространственное разрешение	0.80 м			
Франция, Швеция	Сканерный	Spot	Пространственное разрешение	0.80 м	14.39	15.3	19.62
			Ширина полосы съемки	200 км			
Канада	Радиолокационный	Radarsat	Пространственное разрешение	3 м	9.6	16.2	24
			Ширина полосы съемки	до 185 км			

странение во многих странах мира. В Российской Федерации орбитальная группировка дистанционного зондирования Земли представлена космическими аппаратами серий «Ресурс-П» (2013 г. – н.в.), «Канопус-В» (2012 г. – н.в.), «Метеор-М» (2009–2014 гг.) и «Электро-Л» (2015 г. – н.в.). Анализ назначения и технических возможностей спутников показал, что за счет высоких функциональных характеристик только первые два аппарата могут использоваться для наблюдения за урбанизированной транспортной сетью несмотря на то, что данный вид зондирования не указан в официальной спецификации. Оставшиеся аппараты предназначены исключительно для получения информации в области контроля и охраны окружающей среды.

За рубежом преуспели в этой области Соединенные Штаты Америки со своими спутниками The Landsat Program от NASA/USGS, Maxar [10, 11]. Также космические методы зондирования широ-

ко применяются во Франции, Швеции, Бельгии, где создана система Spot; спутниковые системы активно используются в Японии – ALOS [12], Канаде – RADARSAT [13], Индии – RESOURCESAT, Германии – TERRASAR-X и др. Технические характеристики спутников представлены в таблице 3.

Результаты и обсуждение

Для мониторинга городских территорий преимущественно используется высокодетальная съемка, которая позволяет получать снимки с беспрецедентным разрешением, в том числе обеспечивая возможность идентификации транспортных потоков.

Оценка спутниковых снимков была выполнена через пространственное разрешение, выражающее фактическое количество метров в одном миллиметре изображения [14]. Анализ показал зависимость данного параметра от масштаба изображения (рис. 1).

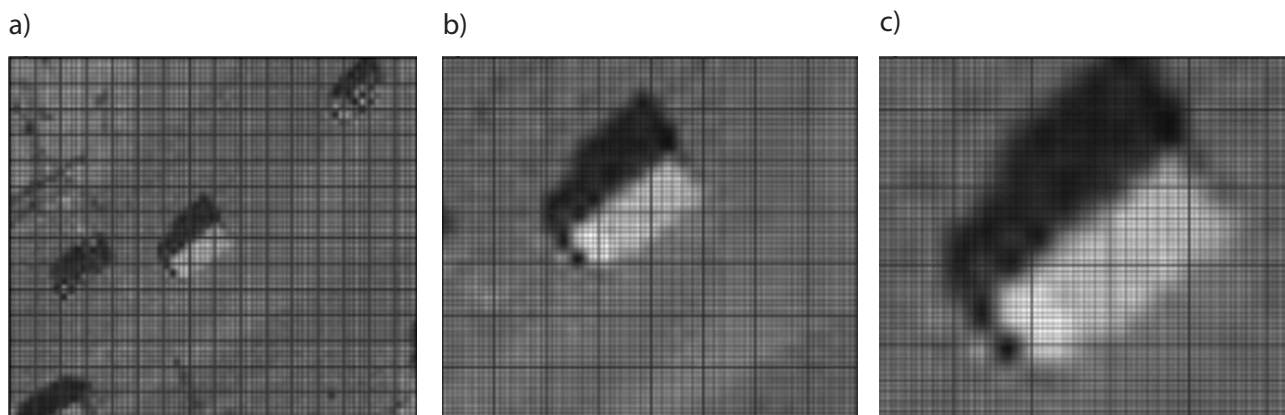


Рис. 1. Многократное увеличение изображения снимка, выполненного спутником Landsat-8 в масштабах: а) 1:600; б) 1:300; в) 1:200
 Fig. 1. Multiple zoom of Landsat-8 satellite image at a scale of: а) 1:600; б) 1:300; в) 1:200

Было установлено, что при многократном увеличении масштаба изображения до критических величин возникают сложности с распознаванием транспортных средств. При всестороннем изучении спутниковых снимков была выявлена дополнительная возможность определения их вида по форме теневой проекции. Граничные значения пространственного разрешения и масштаба, при которых возможно определение транспортного средства и его вида, находятся на основании разработанного графика (рис. 2).

Таким образом, критическим масштабом, при котором идентификация транспортного средства и состава транспортного потока становится

невозможной, является 1:1350, а максимально допустимое для распознавания пространственное разрешение 1/14.8 м/мм достигается при масштабе 1:450.

Наилучшим балансом по качеству съемки и регулярности обновления ресурсов на сегодняшний день характеризуются данные дистанционного зондирования спутниковыми компаниями Соединенных Штатов Америки. Поскольку зондирование осуществляется в общемировом масштабе, появляется возможность использования его результатов во всех странах, включая РФ.

Общедоступные версии картографических ресурсов обычно имеют достаточно низкое разрешение, что не позволяет идентифицировать статичные объекты. Платные версии, например, у Махар, обеспечивают доступ пользователей к высокодетальному контенту, позволяющему решать инженерные задачи различного назначения. Благодаря новейшим разработкам геоинформационные данные можно получать даже при неблагоприятных погодных условиях, но для отдельных съемочных систем все же характерно незначительное снижение качества конечного продукта. Также необходимо учитывать инвариантность пути следования, при котором каждый космический объект, как правило, привязан к индивидуальной орбите, что препятствует использованию спутниковых систем для всех видов зондирования в рамках проектно-изыскательской деятельности транспортного планирования.

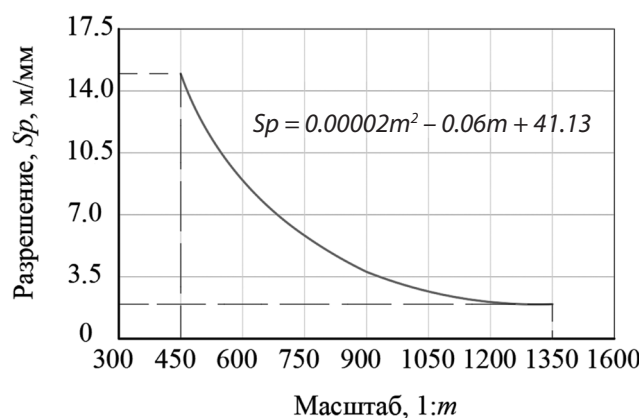


Рис. 2. Графическая зависимость масштаба изображения и его разрешающей способности
 Fig. 2. Graphical dependency of image scale and image resolution

Повышение эффективности зондирования, по мнению авторов, может быть достигнуто за счет обоснования выбора метода мониторинга обследуемой урбанизированной территории. Пространственные элементы инфраструктуры городских территорий имеют различную конфигурацию, размеры и площадь, что и предопределяет рационализацию областей применения способов мониторинга по критерию минимальных ресурсных затрат.

Алгоритм выбора метода мониторинга представлен на рис. 3.

Для незначительных объемов съемки и достаточно малых размеров объекта или при исследовании одиночных линейных сооружений целесообразно прибегать к методу аэрофотосъемки [15]. Современные летательные аппараты (ЛА) ведут съемку на высоте от 100 до 1 500 м от поверхности Земли. Поскольку точность метода зондирования обратно пропорциональна вы-

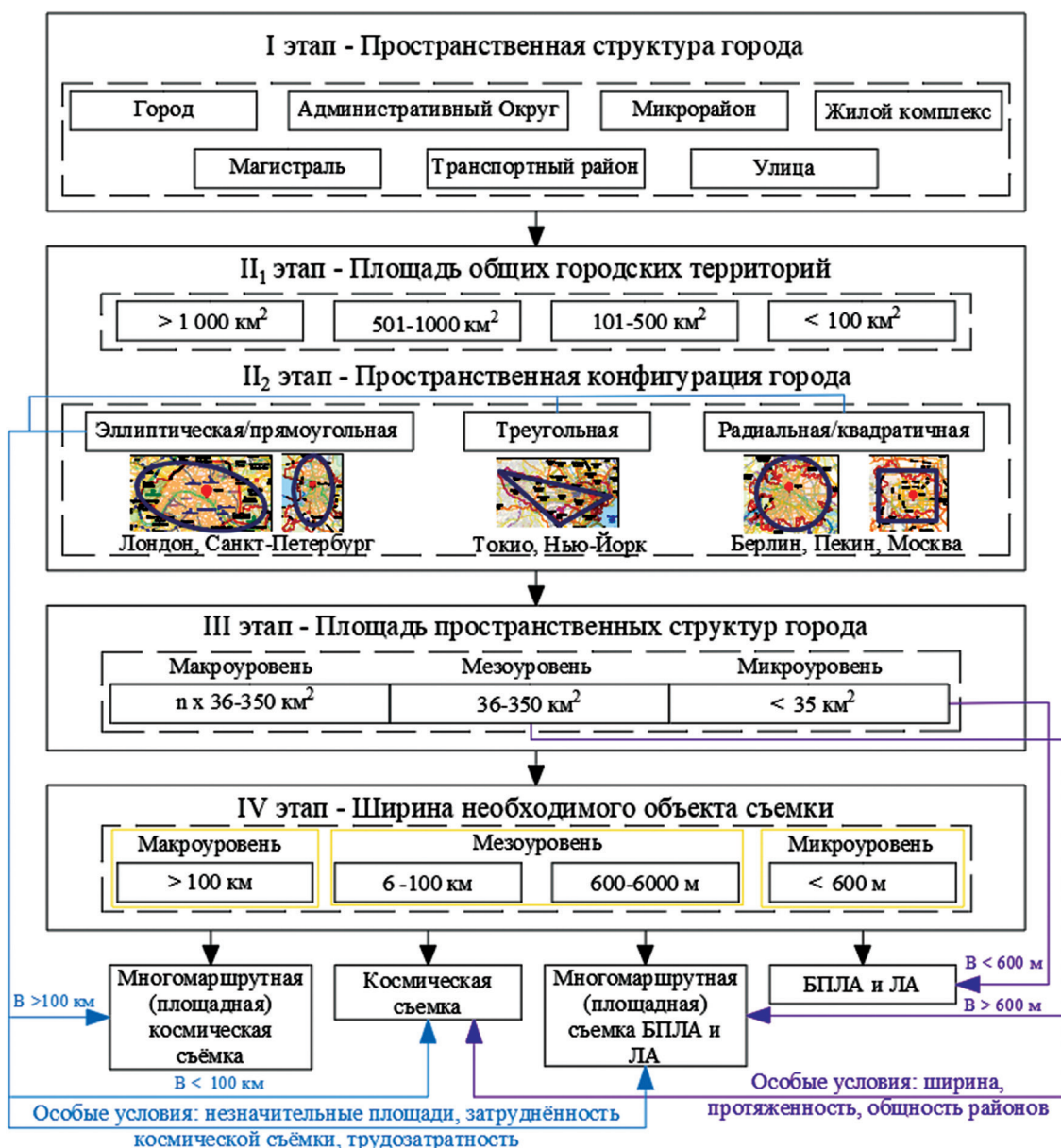


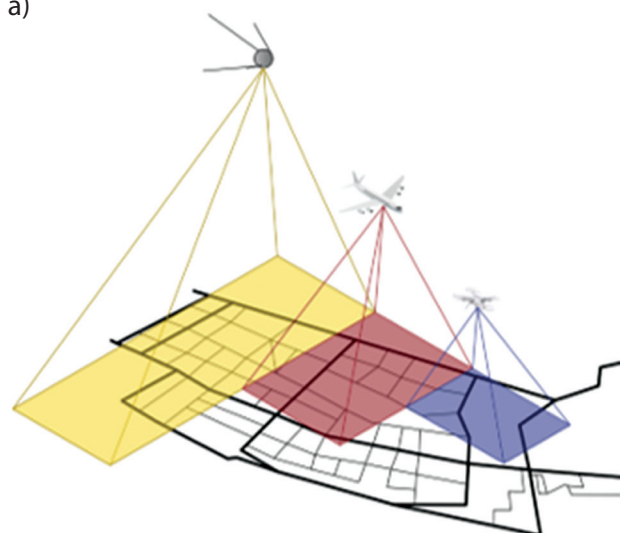
Рис. 3. Алгоритм выбора метода мониторинга транспортных потоков
Fig. 3. Algorithm for selecting a method for monitoring traffic flows

соте съемки, то применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) представляется более рациональным, чем управляемых систем.

Параметрические отличия характеристик космической съемочной системы с БПЛА и ЛА представлены на рис. 4.

На основании ранее представленной информации о конфигурациях и размерных характеристиках выбранных городов (таблица 1) было

a)



b)

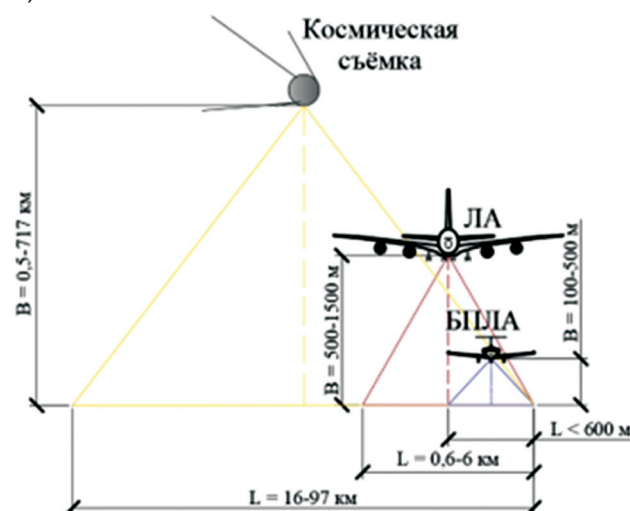


Рис. 4. Схема параметрических особенностей различных методов зондирования:

a) в аксонометрической системе; b) плоское изображение с детализацией

Fig. 4. Schematic of parametric features of different sensing methods:

a) in axonometric system; b) flat image with detailing

выполнено обоснование экономической целесообразности применения съемочных систем различного вида в зависимости от площади съемки.

Формирование стоимости дистанционного зондирования имеет специфические особенности: минимальная площадь съемки составляет 25 км² при использовании съемок, полученных до 1980 года, и 100 км² при осуществлении новой съемки, вследствие чего разница в стоимостном эквиваленте зондирования на микро-, мезо- и макроуровне отсутствует.

Применение управляемых и беспилотных летательных аппаратов имеет схожие характеристики по стоимости и времени съемки единичного пролета по заданной траектории, но в силу малой высоты полета (рис. 4) и, соответственно, небольшой ширины зоны охвата происходит кратное увеличение количества проходов по ширине исследуемой территории, что в среднем на 40 % повышает общую стоимость съемки с БПЛА в сравнении с ЛА.

При значительных масштабах целесообразно прибегнуть к дистанционному зондированию посредством спутникового мониторинга. Для исследования площадей, численно приравняемых к отдельным округам, транспортным районам, составляющим, как правило, не более 1/4–1/10 площади городских территорий, наиболее подходящим по временным и финансовым затратам становится использование пилотируемых летательных аппаратов. При местном проектировании, в частности, отдельных объектов улично-дорожной сети, предпочтительным является использование беспилотных технологий.

Особенностью спутниковых систем является их multifunctionality, что позволяет подбирать рациональный вид съемки под требуемые условия исследования, что выгодно отличает их от БПЛА и ЛА, имеющих стандартные характеристики и предоставляющих практически равнозначные данные.

Детализированные расчеты количества проходов и стоимости съемки, зависящие от метода мониторинга и уровня изученности транспортной системы, представлены в таблице 4 настоящего исследования.

Таблица 4
Table 4

Определение целесообразности применения съемочных систем в зависимости от масштаба поставленной задачи (фрагмент)
Determining the feasibility of shooting systems depending on the scale of the surveyed area (excerpt)

Типо- вая струк- тура города	Наименование города	Стоимость съемки, у. е. / количество проходов									
		Спутниковая съемка / дистанционное зондирование				Управляемые летательные аппараты				Беспилотные летательные аппараты	
		микро- масштаб	мезомас- штаб	макро- масштаб	микро- масштаб	мезомасштаб	макро- масштаб	микро- масштаб	мезомасштаб	макро- масштаб	
Эллиптическая / прямо- угольная	Санкт-Петербург	от 59 400 1	5940-85477 1-4	от 59400 1	от 253 1	19170-454465 7-63	от 1579 1-4	от 354 2	26838-636251 от 63	от 2211 от 4	
	Новосибирск	от 59 400 1	5940-29819 1-2	от 59400 1	от 253 1	22202-158542 4-37	от 1579 1-4	от 354 2	31083-221958 от 37	от 2211 от 4	
	Самара	от 59 400 1	5940-32135 2-4	от 59400 1	от 253 1	15317-170859 4-39	от 1579 1-4	от 354 2	21444-239230 от 39	от 2211 от 4	
	Омск	от 59 400 1	5940-33977 1-3	от 59400 1	от 253 1	31077-180649 4-40	от 1579 1-4	от 354 2	43507-252909 от 40	от 2211 от 4	
	Лондон	от 59 400 1	5940-101848 1-4	от 59400 1	от 253 1	19139-538789 7-69	от 1579 1-4	от 354 2	26794-754305 от 69	от 2211 от 4	
Радиальная / квадра- тинная	Москва	от 59400 1	5940-152123 1-4	от 59400 1	от 253 1	12822-808815 9-85	от 1579 1-4	от 354 2	17951-1132341 от 85	от 2211 от 4	
	Екатеринбург	от 59400 1	7484-29403 1-2	от 59400 1	от 253 1	39793-156331 4-37	от 1579 1-4	от 354 2	55711-218863 от 37	от 2211 от 4	
	Тюмень	от 59400 1	7514-41491 1	от 59400 1	от 253 1	39951-220600 5-44	от 1579 1-4	от 354 2	55932-308840 от 44	от 2211 от 4	
	Берлин	от 59 400 1	5940-52925 1-2	от 59400 1	от 253 1	20434-281396 5-50	от 1579 1-4	от 354 2	28607-393954 от 50	от 2211 от 4	
	Пекин	от 59400 1	18070-997979 2-8	от 59400 1	от 253 1	96072-5306092 22-217	от 1579 1-4	от 354 2	134501-7428529 от 217	от 2211 от 4	
Треугольная	Волгоград	от 59400 1	5940-51025 1-2	от 59400 1	от 253 1	22581-271289 5-49	от 1579 1-4	от 354 2	31614-379805 от 49	от 2211 от 4	
	Нижний Новгород	от 59400 1	5940-30532 1-4	от 59400 1	от 253 1	29687-162331 4-38	от 1579 1-4	от 354 2	41562-227264 от 38	от 2211 от 4	
	Токио	от 59400 1	5940-130324 1-4	от 59400 1	от 253 1	10991-692909 8-78	от 1579 1-4	от 354 2	15387-970073 от 78	от 2211 от 4	
	Нью-Йорк	от 59400 1	8845-72165 1-3	от 59400 1	от 253 1	47026-383690 6-58	от 1579 1-4	от 354 2	65836-537166 от 58	от 2211 от 4	

Примечание: в мезомасштабе рассматривались районы городов и города в целом, в макромасштабе – наиболее протяженные и крупные транспортные объекты (магистральные дороги и улицы общегородского значения), районы города площадью до 5 км²; микромасштаб – микрорайоны небольшой площади (до 0.8 км²), малые транспортные объекты местного значения

Стоимость каждого отдельного вида съемки зависит от множества факторов, в первую очередь, это точность и пространственное разрешение, которое желает получить пользователь. Таким образом, в зависимости от масштабов и пространственной конфигурации изучаемого объекта, необходима количественная дифференциация различных методов исследования.

В качестве технико-экономического критерия целесообразности применения того или иного метода исследования движения был использован предложенный авторами относительный показатель «стоимость единицы точности» (C_{ET}), рассчитываемый по формуле:

$$C_{ET} = \frac{C}{T},$$

где C – стоимость определения интенсивности движения, руб.;

T – точность определения интенсивности движения, %.

Ранжирование рассматриваемых методов дистанционного зондирования по критерию C_{ET} представлено на рис. 5.

Анализ полученных результатов показал, что наименьшей стоимостью (0.08 тыс. руб. для микроуровня, 3.4 тыс. руб. для мезоуровня и 7.9 тыс. руб. для макроуровня) единицы точности характеризуется метод дистанционного спутникового мониторинга, который может быть рекомендован как приоритетный для изучения характеристик дорожного движения независимо от площади урбанизированной транспортной сети (рис. 5).

Выводы

Изучение городского транспортного движения необходимо для формирования эффективной транспортной системы в целом.

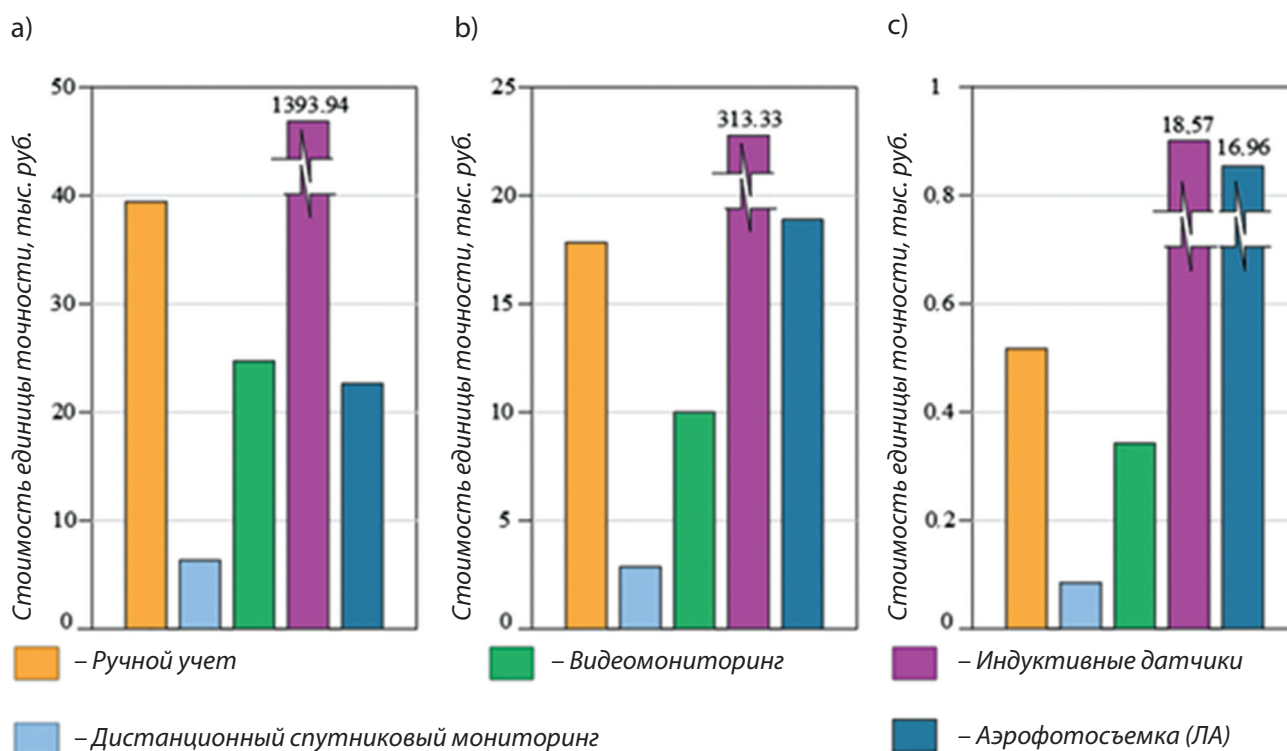


Рис. 5. Методы дистанционного зондирования транспортных потоков по критерию стоимости единицы точности: а) макроуровень (45 км²); б) мезоуровень (20 км²); в) микроуровень (0.6 км²)
 Fig. 5. Methods for remote sensing of traffic flows according to the criterion of cost per unit of accuracy:
 а) macro level (45 км²); б) meso level (20 км²); в) micro level (0.6 км²)

Для получения репрезентативной информации мы предлагаем опираться на данные дистанционного зондирования. В ходе исследования:

1. Проанализированы характеристики современных спутниковых систем и выполнено их ранжирование по точности съемки, позволившее выбрать спутники в зависимости от необходимой точности и стоимости съемки. Лучшими по рассматриваемым характеристикам можно считать спутники The Landsat Program и Maxar (США).
2. Установлена корреляция пространственного разрешения спутниковых снимков от масштаба изображения с картографических онлайн-ресурсов, при которых возможна идентификация транспортного средства и состава движения. Критическими значениями, при которых идентификация невозможна, являются пространственное разрешение 1/14.8 м/мм при масштабе 1:450, а также масштаб мельче 1:1 350.
3. Составлен алгоритм выбора метода мониторинга дорожного движения при съемке городской территории и транспортной сети различных размеров, позволивший определить количество проходов источников

воздушного зондирования (до 217) и их стоимость для 14 городских агломераций РФ и зарубежных стран.

4. Выполнено технико-экономическое обоснование областей применения методов дистанционного зондирования дорожного движения по критерию «стоимости единицы точности» при различной ресурсной обеспеченности субъектов дорожного хозяйства и масштаба решаемых задач. Минимальной стоимостью критерия сравнения (0.08 для микроуровня, 3.4 для мезоуровня и 7.9 для макроуровня) характеризуется метод дистанционного спутникового зондирования, что позволяет рекомендовать его как приоритетный при исследовании любых площадей городской транспортной сети.

В развитие исследования в настоящее время ведутся работы по апробации методики дистанционного зондирования транспортных потоков на улицах с нерегулярным движением, оценке корреляционной зависимости состава движения от мощности объектов городской инфраструктуры и созданию программного продукта по автоматизации дешифровочных алгоритмов определения параметров дорожного движения.

Библиографический список

1. Zhuykov, S. V. Methods of Architectural Planning for the Development of Urban Areas / S. V. Zhuykov. – Текст : непосредственный // Components of Scientific and Technological Progress. – 2021. – No 5 (59). – P. 20–23.
2. Шестеров, Е. А. Создание координированной транспортной системы при территориально-транспортном планировании развития городских территорий / Е. А. Шестеров. – DOI 10.31675/1607-1859-2023-25-3-30-38. – Текст : непосредственный // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 30–38.
3. Национальный проект «Жилье и городская среда» // Минстрой России : сайт. – URL: <https://minstroyrf.gov.ru/trades/natsionalnye-proekty/natsionalnyy-proekt-zhilye-i-gorodskaya-sreda/> (дата обращения: 22.09.2023). – Текст : электронный.
4. Дрю, Д. Р. Теория транспортных потоков и управление ими / Д. Р. Дрю ; пер. с англ. Е. Г. Коваленко, Г. Д. Шермана. – Москва : Транспорт, 1972. – 424 с. – Текст : непосредственный.
5. Кудашев, Е. Б. Конвергенция новейших информационных технологий и методов дистанционного зондирования Земли для построения аэрокосмического экологического мониторинга мегаполисов / Е. Б. Кудашев, В. П. Мясников, О. В. Сюнтюрено. – Текст : непосредственный // Вестник РФФИ. – 2001. – № 2. – С. 47–54.
6. Kryukovsky A.S. Ionospheric inhomogeneities and their influences on the Earth's remote sensing from space / A. S. Kryukovsky, B. G. Kutuza, V. I. Stasevich, D. V. Rastyagaev. – DOI 10.3390/rs14215469. – Текст : непосредственный // Remote Sensing. – 2022. – Vol. 14, No. 21. – P. 5469.
7. Тимоховец, В. Д. Совершенствование методов дистанционного мониторинга транспортных потоков для проектирования улично-дорожной сети крупных городов : специальность 05.23.11 «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей» : диссертация на

- соискание ученой степени кандидата технических наук. – Текст : непосредственный / Тимоховец Вера Дмитриевна. – Омск, 2020. – 133 с.
8. Тестешев, А. А. Полипараметрические уравнения для дешифровки результатов дистанционного спутникового мониторинга транспортных потоков / А. А. Тестешев, В. Д. Тимоховец, Т. Г. Микеладзе. – Текст : непосредственный // Транспортное строительство. – 2018. – № 5. – С. 19–21.
 9. Khutorova, O. G. Some regularities of atmospheric mesoscale variations obtained from satellite navigation system remote sensing / O. G. Khutorova, V. N. Khutorov. – DOI 10.21046/2070-7401-2020-17-6-76-81. – Текст : непосредственный // Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa. – 2020. – Vol. 17, No. 6. – P. 76–81.
 10. Landsat Science : сайт. – URL: <https://landsat.gsfc.nasa.gov> (дата обращения: 22.03.2019). – Текст : электронный.
 11. Maxar Satellite Constellation // University of Minnesota. Driven to discover : сайт. – 2023. – October 3. – URL: <https://www.pgc.umn.edu/guides/commercial-imagery/maxar-satellite-constellation/> (дата обращения: 22.10.2023).
 12. ALOS (PRISM, AVNIR-2, PALSAR) (Япония) // Сканэкс : сайт. – URL: <https://www.scanex.ru/data/satellites/alos/> (дата обращения: 22.03.2023). – Текст : электронный.
 13. Earth observation satellites. – Текст : электронный // Government of Canada : сайт. – URL: <https://asc-csa.gc.ca/eng/satellites/earth-observation/default.asp> (дата обращения: 22.08.2023).
 14. Testeshev, A. Development of harmonized multifactor mono-dependency to decipher satellite-based monitoring of traffic streams / A. Testeshev, V. Timohovetz, T. Mikeladze. – DOI 10.1016/j.trpro.2018.12.096. – Текст : непосредственный // Transportation Research Procedia, Saint Petersburg, September, 27–29, 2018. Vol. 36. – Saint Petersburg : Elsevier B.V., 2018. – P. 747–753.
 15. Денисова, В. В. Аэрофотосъемка / В. В. Денисова. – Текст : непосредственный // Молодежь и научно-технический прогресс : международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, Губкин, 16 апреля 2015 года. Том 1. – Губкин : Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2015. – С. 292–294.

References

1. Zhuykov, S. V. (2021). Methods of architectural planning for the development of urban areas. Components of Scientific and Technological Progress, (5(59)), pp. 20-23. (In English).
2. Shesterov, E. A. (2023). Coordinated transport system in territory and transportation development in urban areas. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Journal of Construction and Architecture, 25(3), pp. 30-38. (In Russian). DOI 10.31675/1607-1859-2023-25-3-30-38.
3. Natsional'nyy proekt "Zhil'e i gorodskaya sreda". Available at: <https://minstroyrf.gov.ru/trades/natsionalnye-proekty/natsionalnyy-proekt-zhilye-i-gorodskaya-sreda/> (accessed 22.09.2023). (In Russian).
4. Drew, D. R. (1968). Traffic flow theory and control. New York, St. Louis, San Francisco, Toronto, London, Sydney, Publ. McGraw-Hill book company, 467 p. (In English).
5. Kudashev, E. B., Myasnikov, V. P., & Syuntyurenko, O. V. (2001). Konvergentsiya noveyshikh informatsionnykh tekhnologiy i metodov distantionnogo zondirovaniya Zemli dlya postroeniya aerokosmicheskogo ekologicheskogo monitoringa megapolisov. Russian Foundation for Basic Research Journal, (2), pp. 47-54. (In Russian).
6. Kryukovsky, A. S., Kutuza, B. G., Stasevich, V. I., & Rastyagaev, D. V. (2022). Ionospheric inhomogeneities and their influences on the Earth's remote sensing from space. Remote Sensing, 14(21), pp. 5469. (In English). DOI 10.3390/rs14215469.
7. Timohovets, V. D. (2020). Sovershenstvovanie metodov distantionnogo monitoringa transportnykh potokov dlya proektirovaniya ulichno-dorozhnoy seti krupnykh gorodov. Diss. kand. tekhn. nauk. Omsk, 133 p. (In Russian).
8. Testeshev, A. A., Timokhovets, V. D., & Mikeladze, T. G. (2018). Development of polyparametric equations for interpretation of results of remote satellite-based monitoring of traffic flows. Transportnoe stroitel'stvo, (5), pp. 19-21. (In Russian).
9. Khutorova, O. G., & Khutorov, V. N. (2020). Some regularities of atmospheric mesoscale variations obtained from satellite navigation system remote sensing. Sovremennye problemy distantionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 17(6), pp. 76-81. (In English). DOI 10.21046/2070-7401-2020-17-6-76-81.

10. Landsat Science. Available at: <https://landsat.gsfc.nasa.gov> (accessed 22.03.2019).
11. Maxar Satellite Constellation. Available at: <https://www.pgc.umn.edu/guides/commercial-imagery/maxar-satellite-constellation/> (accessed 22.10.2023).
12. ALOS (PRISM, AVNIR-2, PALSAR) (Japan). Available at: <https://www.scanex.ru/data/satellites/alos/> (accessed 22.03.2023).
13. Earth observation satellites. Available at: <https://asc-csa.gc.ca/eng/satellites/earth-observation/default.asp> (accessed 22.08.2023).
14. Testeshev, A., Timohovetz, V. & Mikeladze, T. (2018). Development of harmonized multifactor mono-dependency to decipher satellite-based monitoring of traffic streams. Transportation Research Procedia, Saint Petersburg, September, 27-29. Saint Petersburg, Publ. Elsevier B.V., 36, pp. 747-753. (In English). DOI 10.1016/j.trpro.2018.12.096.
15. Denisova, V. V. (2015). Aerofotos"emka. Molodezh' i nauchno-tekhnicheskii progress : mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya studentov, aspirantov i molodykh uchenykh, Gubkin, April, 15. Gubkin, Belgorod State Technological University BSTU named After V. G. Shoukhov Publ., Vol. 1, pp. 292-294. (In Russian).

Сведения об авторах

Тестешев Александр Александрович, канд. техн. наук, доцент кафедры автомобильных дорог и аэродромов, Тюменский индустриальный университет, e-mail: testeshevaa@tyuiu.ru. ORCID 0009-0005-1719-1637

Тимоховец Вера Дмитриевна, канд. техн. наук, доцент кафедры автомобильных дорог и аэродромов, Тюменский индустриальный университет, e-mail: timohovetsvd@tyuiu.ru. ORCID 0000-0002-3927-2332

Бабич Татьяна Григорьевна, ассистент кафедры автомобильных дорог и аэродромов, Тюменский индустриальный университет, e-mail: babichtg@tyuiu.ru. ORCID 0009-0001-9356-0159

Information about the authors

Alexander A. Testeshev, Cand. Sc. in Engineering, Associate Professor at the Department of Highways and Airfields, Industrial University of Tyumen, e-mail: testeshevaa@tyuiu.ru. ORCID 0009-0005-1719-1637

Vera D. Timohovets, Cand. Sc. in Engineering, Associate Professor at the Department of Highways and Airfields, Industrial University of Tyumen, e-mail: timohovetsvd@tyuiu.ru. ORCID 0000-0002-3927-2332

Tatyana G. Babich, Assistant at the Department of Highways and Airfields, Industrial University of Tyumen, e-mail: babichtg@tyuiu.ru. ORCID 0009-0001-9356-0159

*Получена 29 сентября 2023 г., одобрена 02 ноября 2023 г., принята к публикации 15 декабря 2023 г.
Received 29 September 2023, Approved 02 November 2023, Accepted for publication 15 December 2023*