

Перспективы многолетних спутниковых оценок автомобильного трафика на примере мегаполисов Казахстана

А. Г. Терехов^{1,3}, Р. И. Мухамедиев², Е. С. Витулёва²

¹ *Институт информационных и вычислительных технологий
Алматы, 050010, Казахстан
E-mail: aterekhov1@yandex.ru*

² *Казахский национальный исследовательский университет им. К. И. Сатпаева
Алматы, 050013, Казахстан
E-mail: ravil.muhamedyev@gmail.com*

³ *РГП «Казгидромет», Алматы, 050022, Казахстан
E-mail: terekhov_a@meteo.kz*

В последние годы в Казахстане происходит значительное развитие различных наземных городских систем видеоконтроля автомобильных потоков. Однако в задачах оценки параметров многолетних трендов загруженности городских улиц, благодаря наличию глубоких архивов, спутниковая информация остаётся практически безальтернативной. В работе рассмотрен информационный потенциал открытого архива спутниковой съёмки субметрового пространственного разрешения сервиса Google Earth с глубиной до 25 лет. Городской автомобильный транспорт считается одним из основных источников загрязнения урбанизированных территорий. Многолетняя количественная информация об автомобильных потоках представляет значительный интерес для понимания текущего экологического состояния и оценки его перспектив. Для десяти тестовых участков в трёх мегаполисах Казахстана (Алматы, Астана, Шымкент) был проведён многолетний мониторинг параметров автомобильных потоков. С помощью экспертного дешифрирования регистрировалось число машин на тестовом участке. Затем рассчитывались два параметра: число машин на километр полосы движения и число машин на квадратный километр дорожного полотна. Таким образом, были оценены средние параметры многолетней динамики городских автомобильных потоков в мегаполисах Казахстана для периода 2011–2024 гг. В Алматы на обследованных участках дорожной инфраструктуры параметры средних изменений плотности автомобильных потоков за год показали рост +0,376 машин на километр полосы движения и +61,69 машин на квадратный километр дорожного полотна; в Астане — соответственно –0,187 и –10,18; в Шымкенте — +0,558 и +194,00 соответственно. Таким образом, спутниковые количественные оценки трендов изменений плотности автомобильных потоков в мегаполисах Казахстана, полученные на основе открытого сервиса Google Earth, могут служить источником информации для анализа и прогноза экологического состояния воздушных бассейнов крупных городов Казахстана. Подобный подход может быть полезным для малобюджетных и пилотных экологических исследований городской среды.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, субметровые спутниковые снимки, многолетний спутниковый мониторинг, городской автомобильный транспорт, городская инфраструктура, городской трафик

Одобрена к печати: 05.11.2025
DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-392-399

Городской автомобильный транспорт — один из основных источников загрязнения воздуха урбанизированных территорий (Bechtel et al., 2017; Haas et al., 2015; Jafari et al., 2021; Khreis et al., 2024; Kumar et al., 2021; Lopez-Aparicio et al., 2025; Mitsakou et al., 2021). В связи с этим наиболее серьёзные экологические проблемы возникают в крупных городах. Машины представляются источниками шума, пыли, а также выбросов вредных веществ, загрязняющих воздушный бассейн. Увеличение автомобильного трафика в мегаполисах Казахстана, таких как города Алматы, Астана и Шымкент, способствует росту выбросов различных вредных газов, в том числе диоксида азота, что может быть оценено, например, с помощью спутни-

ковых данных (Бриль и др., 2024). Понимание перспектив развития экологического состояния в городах требует анализа фактической информации об автомобильном трафике. Автомобильный трафик может описываться как прямыми параметрами, такими как число машин на квадратный километр дорожного полотна или число машин на километр полосы движения, так и косвенными, например средней скоростью передвижения машин, числом зарегистрированных в городе машин или объёмом продаваемого там автомобильного топлива. Наиболее широко распространённым параметром является средняя скорость движения машин, которая служит основой для специальных мобильных приложений, например в Яндекс Картах. Однако параметры пробок (их балльность) сложным образом связана с числом машин, что затрудняет использование этой информации в прямых количественных оценках трафика.

Наиболее доступные показатели, связанные с интенсивностью автомобильного движения, — это число зарегистрированных в городе машин и объём проданного на городских заправках топлива (бензина, дизеля). Однако городское движение не формируется всеми зарегистрированными в городе машинами. В мегаполисах обычно развит общественный транспорт, предоставляющий более удобный и дешёвый способ перемещения внутри города (Mohan, Tiwari, 2000). С другой стороны, в мегаполис приезжает большое количество машин, не зарегистрированных в городе. Всё это затрудняет оценки фактического количества машин, присутствующих на дорогах города, особенно в аспекте многолетней динамики плотности автомобильных потоков (Quaassdorff et al., 2022).

Информация о фактическом количестве машин на проезжей части дорог в городе потенциально может быть получена тремя вариантами: 1) из специально организованной системы регистрации машин на выбранном участке дороги; 2) из анализа видеопотока камер наблюдения за дорожным движением; 3) по данным дистанционного зондирования, включая спутниковые снимки. Текущие исследования могут базироваться на первом или втором варианте исходной информации. В случае задачи многолетнего исторического мониторинга фактического числа машин на проезжей части спутниковая информация, имеющая значительные исторические архивы, не имеет конкуренции.

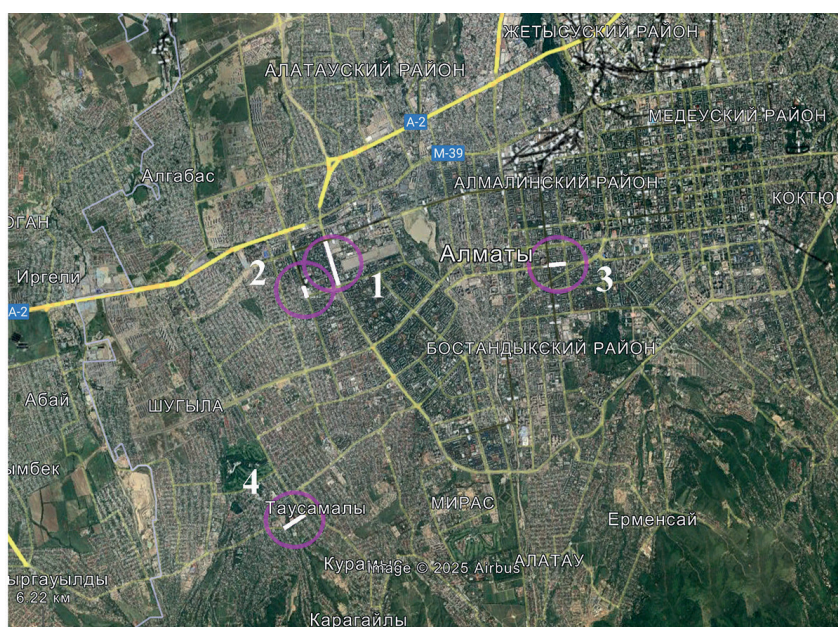
Субметровая спутниковая съёмка в видимом диапазоне спектра способна обеспечивать чёткое распознавание числа машин на дорогах (Patino, Duque, 2013; Sheehan et al., 2023) (рис. 1, см. с. 394). При этом спутниковые данные имеют ряд особенностей. Полярно-орбитальные, гелиосинхронные спутники субметрового разрешения сканируют подстилающую поверхность в одно и то же время суток. Обычно во время близкое к полдню, когда освещённость территории обеспечивается солнцем, находящимся в позициях, близких к максимальному возвышению. Таким образом, спутниковая диагностика напряжённости автомобильного трафика не может быть приурочена к любому, произвольному выбранному времени суток, в том числе к наиболее интересным утренним и вечерним часам пик. Доступные спутниковые данные относятся к времени между часами пик, т.е. к времени с относительно низкой загрузкой дорожной сети. Однако и такие сравнительные оценки могут нести важную информацию о многолетних трендах интенсивности городского транспорта.

Архив субметровой съёмки в сервисе Google Earth является открытым. Наиболее старая съёмка мегаполисов Казахстана относится к 2000 г. Фактическая частота покрытия спутниковой съёмкой варьируется для различных городов Казахстана и в среднем составляет от 50 до 100 безоблачных сцен за весь период наблюдений. Этого вполне достаточно для получения робастной статистической оценки изменений многолетних параметров автомобильного потока на тестируемых частях городских магистралей в рамках линейно-регрессионной модели.

Для оценки перспектив использования снимков субметрового разрешения в задаче мониторинга числа машин в рабочие дни на городских улицах был проведён экспертный анализ архивов субметровой съёмки системы Google Earth для ряда участков дорог в трёх крупнейших городах, мегаполисах Казахстана. В городе Алматы (население 2,2 млн человек) было рассмотрено четыре тестовых участка, а в городах Астане (1,5 млн человек) и Шымкенте (1,3 млн человек) — по три (рис. 2, см. с. 394).



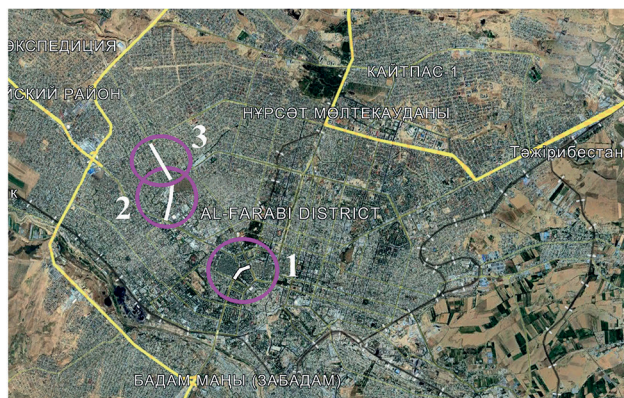
Рис. 1. Пример отображения автомашин на улицах города Алматы в сервисе Google Earth с помощью субметровой спутниковой съёмки. Участок проспекта Абая от улицы Тлендиева до улицы Брусиловского. Съёмка 6 марта 2025 г.



а



б



в

Рис. 2. Картограммы городских улиц с отметками тестовых участков для мегаполисов Казахстана: а — Алматы (4 участка); б — Астана (3 участка); в — Шымкент (3 участка)

Городская транспортная инфраструктура постоянно развивается во времени. За 25 лет возможно проведение различных реконструкций улиц. К ключевым параметрам тестового участка относятся ширина дороги и число транспортных полос. Для получения сопоставимых данных для мониторинга был выбран период с 2011 по 2024 г. и тестовые участки улиц, у которых обеспечивалась стабильность технических характеристик дорожного полотна. Методика определения числа машин базировалась на экспертной дешифровке спутникового снимка. Число машин, зарегистрированных на тестовом участке, использовалось для расчёта мгновенного значения (на момент пролёта спутника) числа автомобилей на дорожном полотне и среднего числа автомобилей на полосе движения.

Оптимальный размер длины выбранного тестового участка транспортной магистрали при экспертном дешифрировании был определён примерно в 1000 м, что обеспечивает быстрый экспертный анализ спутниковой сцены без необходимости использования функции масштабирования. Для мониторинга были отобраны представительные участки транспортной инфраструктуры города, характеризующие общую ситуацию, в том числе и сильно загруженные в период начала мониторинга. Задачи данного исследования включали тестирование информативности спутниковых данных субметрового разрешения, доступных в сервисе Google Earth, в вопросах диагностики городского автомобильного движения, поэтому число участков мониторинга было ограничено. Суммарно по трём городам было выбрано 10 тестовых участков.

За период мониторинга число спутниковых покрытий тестовых участков городской инфраструктуры варьировалось от 32 (Шымкент, участок № 3) до 71 (Астана, участок № 2). Оценки автомобильного трафика проводились только в рабочие дни, а получаемые данные имели вид облаков точек (рис. 3). Для сравнительного анализа динамики изменений напряжённости автомобильного трафика на тестовых участках применялась линейная аппроксимация (метод наименьших квадратов) (рис. 4, см. с. 396). При этом для описания использовались два параметра: 1) число машин, нормированное на единицу длины транспортной магистрали, с учётом рядности дороги, с размерностью «число машин на 1000 м ряда движения» и 2) число машин, нормированное на единицу площади транспортной магистрали, с размерностью «число машин на 1 км² дорожного полотна». Итоговый результат имел формат средней тенденции по тестовым участкам отдельных городов (см. рис. 4). Было получено, что средние параметры годовых изменений автомобильных потоков на проанализированных участках составили: для Алматы +0,376 машин в год на километр полосы движения и +61,69 машин на квадратный километр дорожного полотна; в Астане — соответственно –0,187 и –10,18; в Шымкенте — +0,558 и +194,00 соответственно.

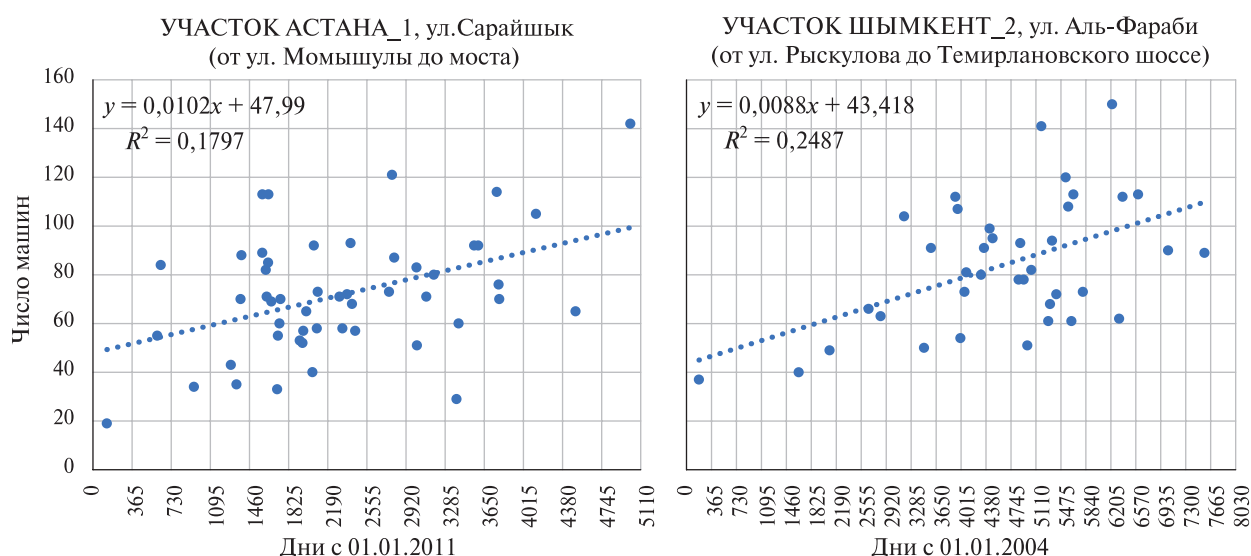


Рис. 3. Результаты анализа спутникового мониторинга числа машин, находящихся в пределах тестовых участков «Астана-1» (2011–2024) и «Шымкент-2» (2004–2024) Построено по данным субметрового спутникового мониторинга сервиса Google Earth

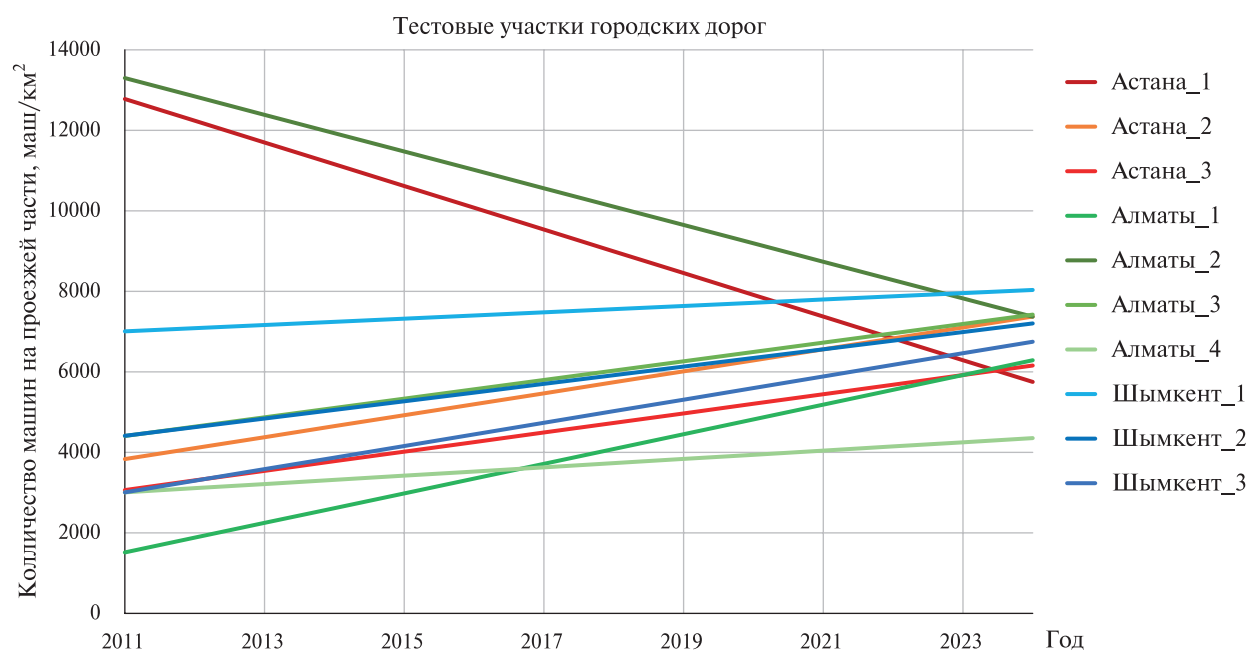


Рис. 4. Линейно-регрессионные кривые данных о загруженности тестовых участков дорог в мегаполисах Казахстана в период 2011–2024 гг. Построено по данным субметрового спутникового мониторинга сервиса Google Earth

Отрицательные значения для Астаны, по всей видимости, вызваны бурным развитием инфраструктуры этого города, который стал столицей Казахстана с конца 1997 г. Кроме того, ограниченное число тестовых участков не обеспечивает статистически устойчивую оценку для всего города.

Таким образом, открытые спутниковые данные субметрового разрешения из сервиса Google Earth могут выступать в качестве источника информации о трендах количественных параметров автомобильных потоков в крупных городах. Такой подход даёт возможность расширить принципы комплексной оценки экологического состояния городов (Тронин и др., 2024), включив в рассмотрение прямые численные характеристики автомобильных потоков в городе, что может быть полезным для малобюджетных и пилотных экологических исследований городской среды. Замена экспертной дешифровки на методы автоматического распознавания (Larsen et al., 2009; Mansour et al., 2019), потенциально, может значительно повысить пространственную детализацию анализа городского трафика включением в неё большего числа анализируемых улиц. Такая информация представляется потенциально полезной для планирования развития городской инфраструктуры (Medina-Salgado et al., 2022; Mohan, Tiwari, 2000; Yang et al., 2020), а также в оценках и прогнозе экологического состояния урбанизированных территорий.

Работа выполнена при финансовой поддержке программно-целевого финансирования Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, проект Agroscope № BR24992908.

Литература

1. Брилль А. А., Лупян Е. А., Константинова А. М. и др. Новые информационные продукты о распределении диоксида азота с учётом ветровых условий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 4. С. 301–307. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-301-307.
2. Тронин А. А., Неробелов Г. М., Васильев М. П. Системы спутникового дистанционного зондирования малых газовых компонент атмосферы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 5. С. 49–62. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-49-62.

3. *Bechtel B., Zakšek K., Oßenbrügge J. et al.* Towards a satellite-based monitoring of urban air temperatures // *Sustainable Cities and Society*. 2017. V. 34. P. 22–31. DOI: 10.1016/j.scs.2017.05.018.
4. *Haas J., Furberg D., Ban Y.* Satellite monitoring of urbanization and environmental impacts — A comparison of Stockholm and Shanghai // *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2015. V. 38. P. 138–149. DOI: 10.1016/j.jag.2014.12.008.
5. *Jafari J. A., Charkhloo E., Pasalari H.* Urban air pollution control policies and strategies: a systematic review // *J. Environ Environmental Health Science and Engineering*. 2021. V. 19. No. 2. P. 1911–1940. DOI: 10.1007/s40201-021-00744-4.
6. *Khreis H., Williams H., Abdollahpour S. S. et al.* The nexus of transportation, the built environment, air pollution and health // *Cities and Health*. 2024. 20 p. DOI: 10.1080/23748834.2024.2376389.
7. *Kumar G. P., Lekhana P., Tejaswi M., Chandrakala S.* Effects of vehicular emissions on the urban environment — a state of the art // *Materials Today: Proc.* 2021. V. 45. Pt. 7. P. 6314–6320. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.739.
8. *Larsen S. Ø., Koren H., Solberg R.* Traffic monitoring using very high-resolution satellite imagery // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2009. No. 7. P. 859–869. DOI: 10.14358/PERS.75.7.859.
9. *Lopez-Aparicio S., Grythe H., Drabicki A. et al.* Environmental sustainability of urban expansion: implications for transport emissions, air pollution, and city growth // *Environment Intern.* 2025. V. 196. Article 109310. DOI: 10.1016/j.envint.2025.109310.
10. *Mansour A., Hassan A., Hussein W. M., Said E.* Automated vehicle detection in satellite images using deep learning // *IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering*. 2019. V. 610. Article 012027. DOI: 10.1088/1757-899X/610/1/012027.
11. *Medina-Salgado B., Sánchez-DelaCruz E., Pozos-Parra P., Sierra J. E.* Urban traffic flow prediction techniques: A review // *Sustainable Computing: Informatics and Systems*. 2022. V. 35. Article 100739. DOI: 10.1016/j.suscom.2022.100739.
12. *Mitsakou C., Adamson J. P., Doutsis A. et al.* Assessing the exposure to air pollution during transport in urban areas — evidence review // *J. Transport and Health*. 2021. V. 21. Article 101064. DOI: 10.1016/j.jth.2021.101064.
13. *Mohan D., Tiwari G.* Mobility, environment and safety in megacities: Dealing with a complex future // *IATSS Research*. 2000. V. 24. No. 1. P. 39–46. DOI: 10.1016/S0386-1112(14)60016-9.
14. *Patino J. E., Duque J. C.* A review of regional science applications of satellite remote sensing in urban settings // *Computers, Environment and Urban Systems*. 2013. V. 37. P. 1–17. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2012.06.003.
15. *Quaassdorff C., Smit R., Borge R., Hausberger S.* Comparison of microscale traffic emission models for urban networks // *Environment Research Letters*. 2022. V. 17. No. 9. Article 094030. DOI: 10.1088/1748-9326/ac8b21.
16. *Sheehan A., Beddows A., Green D. C., Beevers S.* City scale traffic monitoring using WorldView satellite imagery and deep learning: A case study of Barcelona // *Remote Sensing*. 2023. V. 15. Article 5709. DOI: 10.3390/rs15245709.
17. *Yang Z., Gao W., Zhao X. et al.* Spatiotemporal patterns of population mobility and its determinants in Chinese cities based on travel big data // *Sustainability*. 2020. V. 12. Article 4012. DOI: 10.3390/su12104012.

Prospects of long-term satellite-based assessment of urban traffic: A case study of megacities of Kazakhstan

A. G. Terekhov^{1,3}, R. I. Mukhamediev², Ye. S. Vitulyova²

¹ *Institute of Information and Computational Technologies, Almaty 050010, Kazakhstan*
E-mail: aterekhov1@yandex.ru

² *K. I. Satbayev Kazakh National Research University, Almaty 050013, Kazakhstan*
E-mail: ravil.muhamedyev@gmail.com

³ *RSE Kazhydromet, Almaty 050022, Kazakhstan*
E-mail: Terekhov_a@meteo.kz

In recent years, Kazakhstan has seen significant development of various ground-based urban video traffic monitoring systems. However, in the tasks of estimating the parameters of long-term trends in urban street congestion, due to the availability of deep archives, satellite information remains virtually without alternative. The paper considers the information potential of the open archive of satellite imagery of sub-meter spatial resolution of Google Earth service with a depth of about 25 years. City automotive transport is considered one of the main sources of pollution in urbanized areas. Long-term quantitative information on automobile traffic flows is of considerable interest for understanding the current environmental condition and assessing its prospects. For ten test sites in three megacities of Kazakhstan (Almaty, Astana, Shymkent), long-term monitoring of traffic flow parameters was carried out. With the help of expert recognition, the number of vehicles in the test area was recorded. Then two parameters were calculated: the number of vehicles per kilometer of the lane and the number of vehicles per square kilometer of the roadway. Average multi-year dynamics of urban traffic flows were evaluated for the period 2011–2024. In Almaty, the average annual change in the surveyed sections of road infrastructure was +0.376 vehicles per kilometer of lane and +61.69 vehicles per square kilometer of road surface; in Astana, –0.187 and –10.18, respectively; in Shymkent, +0.558 and +194.00, respectively. Thus, satellite quantitative estimates of trends in changes in the density of automobile traffic flows in Kazakhstan's megacities, obtained on the basis of the open Google Earth service, can serve as a source of information for analyzing and predicting the ecological state of air basins of large cities in Kazakhstan. This approach can be useful for low-budget and pilot environmental studies of the urban environment.

Keywords: remote sensing, sub-meter satellite images, multi-year satellite monitoring, urban road transportation, urban infrastructure, urban traffic flows

Accepted: 05.11.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-392-399

Reference

1. Bril A. A., Loupian E. A., Konstantinova A. M. et al., New data products on nitrogen dioxide distribution with consideration of wind conditions, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 4, pp. 301–307 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-301-307.
2. Tronin A. A., Nerobelov G. M., Vasiliev M. P., Satellite remote sensing systems for trace gas components of the atmosphere, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 5, pp. 49–62 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-49-62.
3. Bechtel B., Zakšek K., Oßenbrügge J. et al., Towards a satellite-based monitoring of urban air temperatures, *Sustainable Cities and Society*, 2017, V. 34, pp. 22–31, DOI: 10.1016/j.scs.2017.05.018.
4. Haas J., Furberg D., Ban Y., Satellite monitoring of urbanization and environmental impacts — A comparison of Stockholm and Shanghai, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, V. 38, pp. 138–149, DOI: 10.1016/j.jag.2014.12.008.
5. Jafari J. A., Charkhloo E., Pasalari H., Urban air pollution control policies and strategies: a systematic review, *J. Environmental Health Science and Engineering*, 2021, V. 19, No. 2, pp. 1911–1940, DOI: 10.1007/s40201-021-00744-4.
6. Khreis H., Williams H., Abdollahpour S. S. et al., The nexus of transportation, the built environment, air pollution and health, *Cities and Health*, 2024, 20 p., DOI: 10.1080/23748834.2024.2376389.

7. Kumar G. P., Lekhana P., Tejaswi M., Chandrakala S., Effects of vehicular emissions on the urban environment — a state of the art, *Materials Today: Proc.*, 2021, V. 45, Pt. 7, pp. 6314–6320, DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.739.
8. Larsen S. Ø., Koren H., Solberg R., Traffic monitoring using very high-resolution satellite imagery, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2009, No. 7, pp. 859–869, DOI: 10.14358/PERS.75.7.859.
9. Lopez-Aparicio S., Grythe H., Drabicki A. et al., Environmental sustainability of urban expansion: implications for transport emissions, air pollution, and city growth, *Environment Intern.*, 2025, V. 196, Article 109310, DOI: 10.1016/j.envint.2025.109310.
10. Mansour A., Hassan A., Hussein W. M., Said E., Automated vehicle detection in satellite images using deep learning, *IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering*, 2019, V. 610, Article 012027, DOI: 10.1088/1757-899X/610/1/012027.
11. Medina-Salgado B., Sánchez-DelaCruz E., Pozos-Parra P., Sierra J. E., Urban traffic flow prediction techniques: A review, *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 2022, V. 35, Article 100739, DOI: 10.1016/j.suscom.2022.100739.
12. Mitsakou C., Adamson J. P., Doutsis A. et al., Assessing the exposure to air pollution during transport in urban areas — evidence review, *J. Transport and Health*, 2021, V. 21, Article 101064, DOI: 10.1016/j.jth.2021.101064.
13. Mohan D., Tiwari G., Mobility, environment and safety in megacities: Dealing with a complex future, *IATSS Research*, 2000, V. 24, No. 1, pp. 39–46, DOI: 10.1016/S0386-1112(14)60016-9.
14. Patino J. E., Duque J. C., A review of regional science applications of satellite remote sensing in urban settings, *Computers, Environment and Urban Systems*, 2013, V. 37, pp. 1–17, DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2012.06.003.
15. Quaassdorff C., Smit R., Borge R., Hausberger S., Comparison of microscale traffic emission models for urban networks, *Environment Research Letters*, 2022, V. 17, No. 9, Article 094030, DOI: 10.1088/1748-9326/ac8b21.
16. Sheehan A., Beddows A., Green D. C., Beevers S., City scale traffic monitoring using WorldView satellite imagery and deep learning: A case study of Barcelona, *Remote Sensing*, 2023, V. 15, Article 5709, DOI: 10.3390/rs15245709.
17. Yang Z., Gao W., Zhao X. et al., Spatiotemporal patterns of population mobility and its determinants in Chinese cities based on travel big data, *Sustainability*, 2020, V. 12, Article 4012, DOI: 10.3390/su12104012.