

УДК 004.932: 614.842.4

DOI: 10.34670/AR.2026.97.76.024

**Пространственно-частотный и хронологический анализ
видеопоследовательностей для выявления паттернов открытого
пламени и задымления**

Мачихин Вячеслав Андреевич

Кандидат технических наук,
доцент кафедры электронных систем и информационной безопасности,
Самарский государственный технический университет.
443100, Российская Федерация, Самара, ул. Молодогвардейская, 244;
e-mail: vmachihin@mail.ru

Кузьменко Александр Александрович

Кандидат технических наук,
доцент кафедры электронных систем и информационной безопасности,
Самарский государственный технический университет,
443100, Российская Федерация, Самара, ул. Молодогвардейская, 244;
e-mail: alexandr291294@mail.ru

Аннотация

В статье рассматривается проблема повышения точности систем раннего оптического обнаружения лесных пожаров с использованием систем видеонаблюдения. Традиционные методы компьютерного зрения, которые основаны на покадровом анализе цветовых признаков наличия или отсутствия возгорания, обладают высокой долей ложных срабатываний из-за воздействия статических фоновых объектов и сложных погодных условий. В данной работе предложен подход, который базируется на анализе пространственно-временной динамики изображений (последовательности кадров с видеокамеры системы наблюдения). На основе данных системы видеонаблюдения высокой четкости HPWREN исследуется динамика изменения цветовых распределений с помощью хронологических тепловых карт гистограмм, а также проводится анализ изменения спектральной мощности кадров на основе быстрого преобразования Фурье (FFT). В ходе исследования было установлено, что задымление характеризуется устойчивым ростом низкочастотных компонентов и сужением цветового диапазона серого канала, в то время как открытое пламя генерирует аномальные всплески в высокочастотном спектре и красном цветовом канале. Выявленные паттерны могут служить надежными признаками для разработки алгоритмов детекции пожаров с использованием систем видеонаблюдения.

Для цитирования в научных исследованиях

Мачихин В.А., Кузьменко А.А. Пространственно-частотный и хронологический анализ видеопоследовательностей для выявления паттернов открытого пламени и задымления // Вопросы российского и международного права. 2026. Том 16. № 5А. С. 182-190. DOI: 10.34670/AR.2026.97.76.024

Ключевые слова

Компьютерное зрение, лесные пожары, раннее обнаружение, видеонаблюдение, быстрое преобразование Фурье (FFT), пространственно-частотный анализ, тепловые карты гистограмм, HPWREN, методология исследования, цифровая обработка сигналов.

Введение

Актуальность темы. Своевременное обнаружение очагов возгорания и задымления на открытых пространствах является чрезвычайно важной задачей для предотвращения масштабных лесных пожаров, наносящих колоссальный экологический и экономический ущерб. Сегодня активно развиваются системы оптического мониторинга наличия возгорания, которые используют камеры системы видеонаблюдения, устанавливаемых на вышках и с использованием беспилотной авиации [Заворотный, Лавлинский, 2025; Зоев, Марков, Рыжова, 2020]. При использовании данных систем за наличием признаков возгорания отвечает человек, который сидит в центре и следит за множеством камер, при этом имеются проекты по автоматизации данного процесса. Однако автоматизация детектирования сталкивается с рядом трудностей. В реальных условиях на качество изображений влияют изменения освещенности, атмосферные явления (туман, облака, солнечные блики) и сложный рельеф местности.

Традиционные алгоритмы компьютерного зрения, опирающиеся на статический анализ цветовых пространств одиночных кадров, демонстрируют высокую частоту ложных срабатываний [Celik, Demir, 2009; Töreyn и др., 2006; Ko, Cheong, Nam, 2009; Phillips и др., 2000]. Одиночный кадр не предоставляет достаточно информации для отличия развивающегося пожара от статичных объектов, имеющих схожие цвета, как, к примеру, кирпичные строения или транспорт. Аналогичные проблемы классического межкадрового анализа возникают и при детектировании дыма [Богущ, Адамовский, 2023; Korilovic и др., 2000]. Поэтому возникает необходимость перехода от пространственного анализа к пространственно-временному и частотному анализу последовательности кадров с камер систем видеонаблюдения.

Цель и задачи исследования. Целью данной работы является выявление и формализация устойчивых динамических признаков распространения огня и дыма на основе спектрального анализа изображений и хронологического изменения их цветовых характеристик.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- Формирование репрезентативной выборки видеопоследовательностей реальных лесных пожаров.
- Построение и анализ хронологических тепловых карт цветовых гистограмм для оценки динамики изменения контраста и яркости.
- Применение быстрого преобразования Фурье (FFT) для перевода изображений в частотную область с последующей оценкой изменения спектра мощности в низкочастотных и высокочастотных диапазонах.

Материалы исследования. В качестве эмпирической базы в работе использован открытый набор данных HPWREN (High Performance Wireless Research and Education Network) [HPWREN, 2026]. Данный проект, реализуемый Калифорнийским университетом в Сан-Диего, предоставляет обширный мультимедийный архив, зафиксировавший реальные сценарии возникновения и распространения лесных пожаров в Южной Калифорнии на фоне разнообразных ландшафтов. Высокое качество и хронологическая точность материалов

HPWREN делают их оптимальным стандартом для оценки алгоритмов оптического мониторинга.

Материалы и методы

Подготовка и предобработка данных

Для проведения исследования из открытого набора данных HPWREN были отобраны последовательности кадров, на которых был зафиксирован процесс зарождения и развития пожаров. Полученная выборка кадров предварительно группировалась по событиям и строго сортировалась в хронологическом порядке для сохранения временного контекста.

Для анализа оптических признаков пламени и дыма изображения обрабатывались в двух независимых направлениях: цветовом (построение хронологических гистограмм) и частотном (спектральный анализ) [Гонсалес, Вудс, 2012].

Метод хронологических тепловых карт гистограмм

Анализ цветовых гистограмм одиночного изображения не позволяет эффективно выявить аномалии на изображении из-за большого числа пикселей фона (небо, лесной массив, грунт). Для визуализации динамики предложен метод построения хронологической матрицы распределения пикселей (тепловой карты).

Для каждого i -го кадра вычисляются два вектора признаков:

- Гистограмма интенсивности красного канала $H_{R,i}$, которая чувствительна к излучению открытого пламени;
- Гистограмма интенсивности полутонового изображения $H_{G,i}$, отражающая общую яркость и контрастность сцены для детектирования задымления.

Данные векторы были объединены в двумерные матрицы, где ось абсцисс отражает время (номер кадра), а ось ординат – уровень интенсивности пикселя от 0 до 255. Поскольку площадь начинающегося возгорания составляет доли процента от общей площади кадра, для повышения контрастности мелких аномалий применялось логарифмическое масштабирование значений матрицы:

$$M_{log}(x, y) = \ln(1 + M(x, y)),$$

где $M(x, y)$ – количество пикселей с интенсивностью y на кадре x .

Спектральный анализ на основе быстрого преобразования Фурье (FFT)

Дым представляет собой полупрозрачную среду, которая действует как оптический фильтр нижних частот: он сглаживает резкие границы и "размывает" фон. Открытое пламя, напротив, обладает высокой контрастностью, резкими границами и бликами, генерируя высокочастотные всплески.

Для количественной оценки этих явлений каждое полутоновое изображение переводилось в частотную область с использованием двумерного дискретного преобразования Фурье [10]:

$$F(u, v) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{j2\pi \left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N} \right)}.$$

Нулевая частота сдвигалась в центр спектра, после чего вычислялся логарифмический спектр мощности. Для разделения признаков дыма и огня спектр разбивался на три кольцевые

зоны относительно центра:

- Низкие частоты: до 10% от максимального радиуса спектра;
- Средние частоты: от 10% до 30%;
- Высокие частоты: свыше 30%.

Для каждого кадра вычислялась средняя энергия в каждой зоне. Чтобы отследить динамику появления аномалий на изображении, вычислялась следующая разность:

$$\Delta E_k = E_k(i) - E_k(0),$$

где $E_k(i)$ – энергия частотного диапазона k на i -ом кадре, а $E_k(0)$ – энергия на первом (эталонном) кадре до начала возгорания.

Результаты и их обсуждение

Анализ изменения цветовых распределений на тепловых кадрах

Для проверки работы предложенного метода были проанализированы видеопоследовательности. Показательным примером является событие 20170708-Whittier (рис. 1). Особенностью данной сцены является масштабный охват территории: очаг возгорания находится на удалении, из-за чего площадь открытого пламени составляет менее 0.1% от общей площади кадра.

Визуальный анализ показывает первичные признаки задымления в интервале 35–40 кадров, в то время как открытое пламя становится оптически различимым лишь к 70–71 кадру у основания дымового столба.



а)

б)

Рисунок 1 – Кадры события 20170708-Whittier: а) 35ый кадр; б) 71-ый кадр

Построенные хронологические тепловые карты (рис. 2) с высокой точностью отражают данную хронологию:

- Паттерн задымления: начиная с 35–40 кадра, на графике интенсивности серого канала видно выраженное уплотнение и смещение распределения в зону высоких значений. Это подтверждает снижение глобального контраста пейзажа и замещение текстуры фона

однородной дымкой.

- Паттерн пламени: хотя размер очага на изображении является небольшим, тепловая карта фиксирует аномалию, связанную с появлением пламени. Начиная с 70-го кадра, значения красного канала преодолевают пороговый уровень интенсивности (свыше 220), формируя различимый след в верхней части графика. Данный факт подтверждает чувствительность метода гистограмм к удаленным точечным возгораниям, поскольку метод реагирует на появление уникальных значений интенсивности независимо от их пространственной площади.

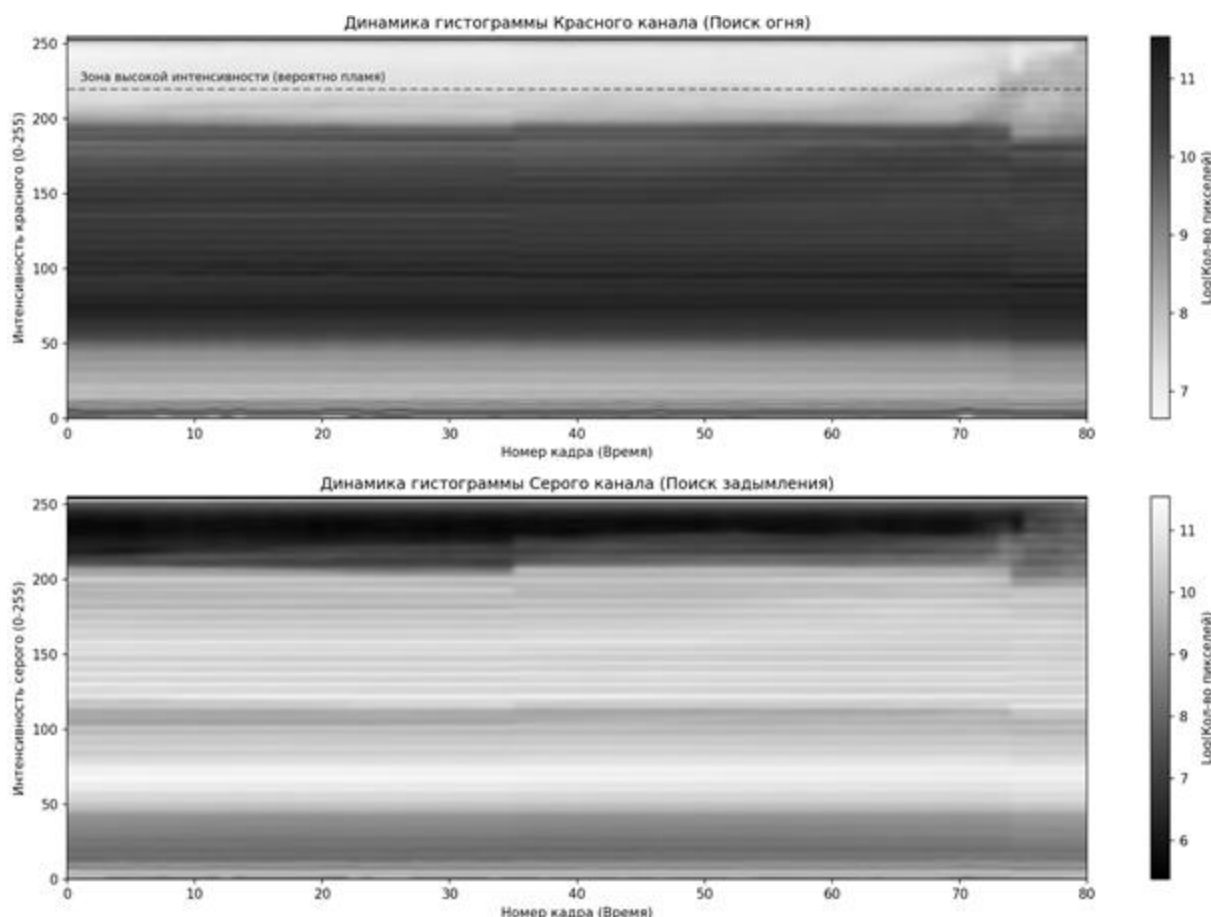


Рисунок 2 – Тепловые карты события 20170708-Whittier

Ограничения глобального спектрального анализа (FFT) при удаленном мониторинге

Результаты пространственно-частотного анализа выявили ограничения метода при работе с широкоугольными панорамными камерами (рис. 3).

В отличие от гистограмм, преобразование Фурье является глобальным оператором. На графике спектральной мощности наблюдается следующее:

- Низкие частоты: на начальных этапах (0–40 кадры) кривая низких частот демонстрирует высокоамплитудные осцилляции, что связано со спецификой time-lapse съемки (микроизменения экспозиции камеры, движение теней от облаков). При этом с развитием задымления характер кривой меняется и дым выступает в роли оптического низкочастотного фильтра, перекрывающего сложный ландшафт, что приводит к стабилизации сигнала и изменению характера его дисперсии, что мы и видим по

- изменению продолжительности импульсов после 35–40го кадра.
- Высокие частоты: в момент появления пламени (70–71 кадры) высокочастотного всплеска, который ожидался, не наблюдается. Отсутствие пика объясняется тем, что высокочастотная энергия от микроскопического очага огня поглощается фоновым высокочастотным "шумом", который генерируется сложной текстурой леса и горного рельефа на большой площади изображения.

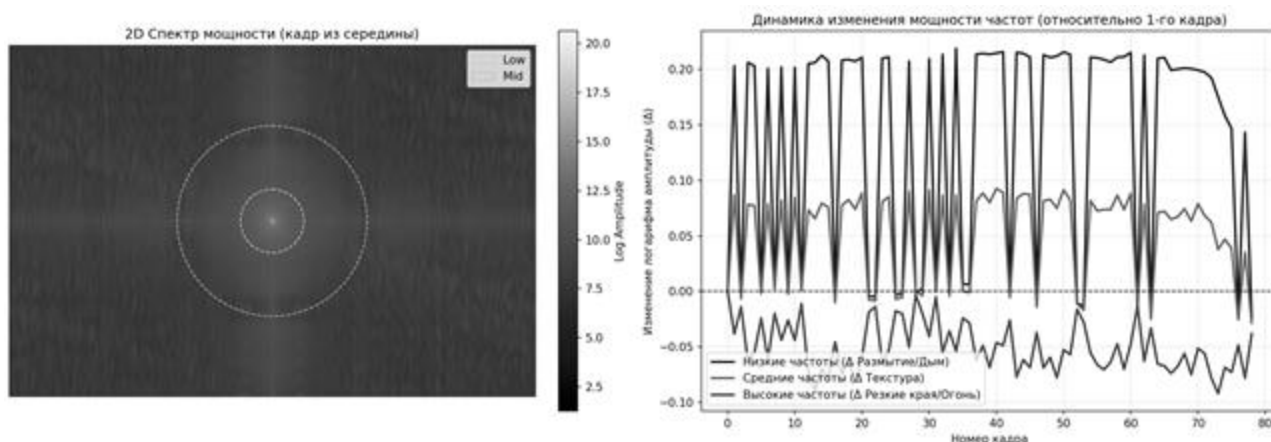


Рисунок 3 – Результаты спектрального анализа события 20170708-Whittier

Исходя из анализа видно, что глобальный спектральный анализ (FFT) всего кадра малоэффективен для раннего обнаружения сверхмалых или удаленных очагов возгорания на фоне сложного ландшафта. Для детектирования открытого пламени на дальних дистанциях метод хронологических тепловых карт демонстрирует значительно большую надежность и робастность.

Заключение

В ходе проведенного исследования были проанализированы пространственно-частотные и хронологические методы выявления оптических признаков лесных пожаров на основе набора данных HPWREN.

Установлено, что предложенный метод хронологических тепловых карт цветowych гистограмм обладает высокой эффективностью. Использование логарифмического масштабирования позволяет уверенно фиксировать момент зарождения задымления и появление открытого пламени даже в случаях, когда площадь аномалии критически мала относительно размеров кадра.

Одновременно с этим выявлены существенные ограничения метода глобального быстрого преобразования Фурье в задачах удаленного мониторинга. Показано, что появление микроскопических очагов пламени не оказывает статистически значимого влияния на высокочастотный спектр панорамного изображения из-за доминирующего влияния текстуры подстилающей поверхности (лесного массива). Анализ низкочастотного спектра позволяет косвенно зафиксировать задымление по изменению характера осцилляций мощности (стабилизации сигнала), однако данный признак менее очевиден по сравнению с цветовым анализом.

Полученные результаты доказывают, что для создания надежных автоматизированных

систем видеонаблюдения необходим отказ от глобального спектрального анализа в пользу методов, локализирующих цветовые аномалии и отслеживающих их межкадровую динамику.

Библиография

1. Богуш Р.П., Адамовский Е.Р. Детектирование дыма на видеопоследовательностях в режиме реального времени // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. 2023. № 4. С. 91–97.
2. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений / пер. с англ. под ред. П.А. Чочиа. М.: Техносфера, 2012. 1104 с.
3. Заворотный А.Г., Лавлинский И.В. Комплексный анализ параметров эффективности применения беспилотных авиационных систем для мониторинга лесных пожаров // Пожарная, экологическая техносферная безопасность. 2025. № 3. С. 59–70.
4. Зоев И.В., Марков Н.Г., Рыжова С.Е. Интеллектуальная система компьютерного зрения беспилотных летательных аппаратов для мониторинга технологических объектов предприятий нефтегазовой отрасли // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331, № 11. С. 137–146.
5. Celik T., Demir H. Fire detection in video sequences using a generic color model // Fire Safety Journal. 2009. Vol. 44, No. 2. P. 147–158. DOI: 10.1016/j.firesaf.2008.05.005.
6. High Performance Wireless Research and Education Network (HPWREN) [сайт проекта]. San Diego: UC San Diego. URL: <https://www.hpwren.ucsd.edu/>.
7. Ko B.C., Cheong K.H., Nam J.Y. Fire detection based on vision sensor and support vector machines // Fire Safety Journal. 2009. Vol. 44, No. 3. P. 322–329.
8. Kopilovic I., Vagvolgyi B., Sziranyi T., et al. Application of panoramic annular lens for motion analysis tasks: surveillance and smoke detection // Proceedings of the 15th International Conference on Pattern Recognition. IEEE, 2000. Vol. 4. P. 714–717.
9. Phillips W., Shah M., Da Vitoria Lobo N. Flame recognition in video // Fifth IEEE Workshop on Applications of Computer Vision. IEEE, 2000. P. 224–229.
10. Töreyin B.U., Dedeoglu Y., Gündükbay U., Cetin A.E. Computer vision based method for real-time fire and flame detection // Pattern Recognition Letters. 2006. Vol. 27, No. 1. P. 49–58.

Spatial-Frequency and Chronological Analysis of Video Sequences for Detecting Patterns of Open Flame and Smoke

Vyacheslav A. Machikhin

PhD in Technology,
Associate Professor of the Department
of Electronic Systems and Information Security,
Samara State Technical University,
443100, 244, Molodogvardeyskaya str., Samara, Russian Federation;
e-mail: vmachihin@mail.ru

Aleksandr A. Kuz'menko

PhD in Technology,
Associate Professor of the Department
of Electronic Systems and Information Security,
Samara State Technical University,
443100, 244, Molodogvardeyskaya str., Samara, Russian Federation;
e-mail: alexandr291294@mail.ru

Abstract

The article examines the problem of increasing the accuracy of early optical detection systems for forest fires using video surveillance systems. Traditional computer vision methods, which are based on frame-by-frame analysis of color features indicating the presence or absence of fire, have a high rate of false alarms due to the impact of static background objects and complex weather conditions. This paper proposes an approach based on the analysis of the spatial-temporal dynamics of images (sequences of frames from a surveillance system video camera). Based on data from the HPWREN high-definition video surveillance system, the dynamics of changes in color distributions are investigated using chronological histogram heat maps, and an analysis of changes in the spectral power of frames based on the Fast Fourier Transform (FFT) is also carried out. In the course of the research, it was established that smoke is characterized by a steady increase in low-frequency components and a narrowing of the color range of the gray channel, while an open flame generates anomalous bursts in the high-frequency spectrum and the red color channel. The identified patterns can serve as reliable features for developing fire detection algorithms using video surveillance systems.

For citation

Machikhin V.A., Kuz'menko A.A. (2026) Prostranstvenno-chastotnyy i khronologicheskiy analiz videoposledovatel'nostey dlya vyyavleniya patternov otkrytogo plameni i zadymleniya [Spatial-Frequency and Chronological Analysis of Video Sequences for Detecting Patterns of Open Flame and Smoke]. *Voprosy rossiiskogo i mezhdunarodnogo prava* [Matters of Russian and International Law], 16 (5A), pp. 182-190. DOI: 10.34670/AR.2026.97.76.024

Keywords

Computer vision, forest fires, early detection, video surveillance, Fast Fourier Transform (FFT), spatial-frequency analysis, histogram heat maps, HPWREN, research methodology, digital signal processing.

References

1. Bogush, R. P., & Adamovsky, E. R. (2023). Detektirovanie dyma na videoposledovatel'nostyakh v rezhime real'nogo vremeni [Smoke detection on video sequences in real time]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C. Fundamental'nye nauki* [Bulletin of Polotsk State University. Series C. Fundamental Sciences], 4, 91–97.
2. Celik, T., & Demir, H. (2009). Fire detection in video sequences using a generic color model. *Fire Safety Journal*, 44(2), 147–158. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2008.05.005>
3. Gonzalez, R., & Woods, R. (2012). *Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy* [Digital image processing] (P. A. Cho-chia, Ed. & Trans.). Tekhnosfera.
4. High Performance Wireless Research and Education Network (HPWREN). (2026) UC San Diego. <https://www.hpwrn.ucsd.edu/>
5. Ko, B. C., Cheong, K. H., & Nam, J. Y. (2009). Fire detection based on vision sensor and support vector machines. *Fire Safety Journal*, 44(3), 322–329.
6. Kopilovic, I., Vagvolgyi, B., Sziranyi, T., et al. (2000). Application of panoramic annular lens for motion analysis tasks: Surveillance and smoke detection. In *Proceedings of the 15th International Conference on Pattern Recognition* (Vol. 4, pp. 714–717). IEEE.
7. Phillips, W., Shah, M., & Da Vitoria Lobo, N. (2000). Flame recognition in video. In *Fifth IEEE Workshop on Applications of Computer Vision* (pp. 224–229). IEEE.
8. Töreyn, B. U., Dedeoglu, Y., Güdükbay, U., & Cetin, A. E. (2006). Computer vision based method for real-time fire and flame detection. *Pattern Recognition Letters*, 27(1), 49–58.
9. Zavorotny, A. G., & Lavlinsky, I. V. (2025). Kompleksnyy analiz parametrov effektivnosti primeneniya bespilotnykh aviatsionnykh sistem dlya monitoringa lesnykh pozharov [Complex analysis of the effectiveness parameters of the use of unmanned aircraft systems for monitoring forest fires]. *Pozharnaya, ekologicheskaya tekhnosfernaya bezopasnost'* [Fire and Environmental Technosphere Safety], 3, 59–70.

-
10. Zoev, I. V., Markov, N. G., & Ryzhova, S. E. (2020). Intellektual'naya sistema komp'yuternogo zreniya bespilotnykh letatel'nykh apparatov dlya monitoringa tekhnologicheskikh ob"ektov predpriyatiy neftegazovoy otrasli [Intelligent computer vision system of unmanned aerial vehicles for monitoring technological facilities of oil and gas industry enterprises]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Georesource Engineering], 331(11), 137–146.