

Программные системы и вычислительные методы*Правильная ссылка на статью:*

Родионов Д.Г., Сергеев Д.А., Конников Е.А., Пашинина П.А. Анализ пространственно-временных закономерностей движения на аэрофотоснимках с использованием оптического потока // Программные системы и вычислительные методы. 2025. № 2. DOI: 10.7256/2454-0714.2025.2.73781 EDN: BSDPGV URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=73781

Анализ пространственно-временных закономерностей движения на аэрофотоснимках с использованием оптического потока**Родионов Дмитрий Григорьевич**

ORCID: 0000-0002-1254-0464

доктор экономических наук

Директор; Высшая инженерно-экономическая школа ; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Калининский р-н, ул. Политехническая, д. 29 литеру Б

✉ rodion_dm@mail.ru**Сергеев Дмитрий Анатольевич**

кандидат экономических наук

доцент; Высшая инженерно-экономическая школа; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
директор; Национальный центр качества и экспертизы; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Калининский р-н, ул. Политехническая, д. 29 литеру Б

✉ sergeev_da@spbstu.ru**Конников Евгений Александрович**

кандидат экономических наук

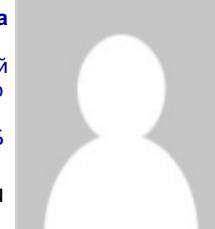
доцент; Высшая инженерно-экономическая школа; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Калининский р-н, ул. Политехническая, д. 29 литеру Б

✉ konnikov_ea@spbstu.ru**Пашинина Полина Александровна**

ассистент; Высшая инженерно-экономическая школа; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Калининский р-н, ул. Политехническая, д. 29 литеру Б

✉ pashinina_pa@spbstu.ruСтатья из рубрики "Системный анализ, поиск, анализ и фильтрация информации"**DOI:**

10.7256/2454-0714.2025.2.73781

EDN:

BSDPGV

Дата направления статьи в редакцию:

21-03-2025

Аннотация: Настоящее исследование посвящено анализу пространственно-временных закономерностей движения объектов на аэрофотоснимках с использованием метода оптического потока. В условиях развития технологий дистанционного зондирования и распространения БПЛА возрастаёт необходимость точного и автоматизированного анализа динамики природных и антропогенных процессов. Основное внимание в работе уделяется детальному изучению направленности и интенсивности движения на изображениях высокой разрешающей способности. Рассматриваются существующие методы оценки оптического потока, включая классические подходы Лукаса-Канаде и Хорна-Шанка, а также плотный оптический поток по Фарнебаку. Последний применяется как базовый метод для построения векторных полей скорости, на основе которых производится анализ распределения движения по сегментам изображения, визуализация направлений и построение тепловых карт. Предложенный подход позволяет выявлять структурные закономерности и локальные особенности движения, что особенно актуально для мониторинга состояния инфраструктурных объектов и оценки экологических рисков. Также в работе показано, что медианные оценки скорости более устойчивы к шумам и локальным выбросам, чем средние значения, что повышает надежность анализа. Метод исследования основан на вычислении плотного оптического потока методом Фарнебека с последующей статистической обработкой характеристик скорости и направлений движения между сегментами изображения. Научная новизна работы заключается в разработке комплексного подхода к анализу пространственно-временных характеристик движения на аэрофотоснимках с использованием плотного оптического потока, рассчитанного методом Фарнебака. В отличие от традиционных методов, ориентированных на глобальную оценку движения, предложенная методика акцентирует внимание на локальных закономерностях, позволяя проводить детализированную сегментную оценку направленности и интенсивности потока. В исследовании впервые интегрированы количественные и визуальные методы анализа: гистограммы, тепловые карты, расчеты медианных и средних значений скорости, метрики структурного сходства (SSIM) и среднеквадратичной ошибки (MSE) между сегментами изображения. Такой подход позволяет выявлять аномалии движения, определять участки с высокой динамикой и оценивать степень структурной стабильности объектов. Метод адаптирован к специфике данных с БПЛА и не требует обучения на больших выборках, что делает его применимым в условиях ограниченных вычислительных ресурсов. Полученные результаты имеют практическую ценность для автоматизации мониторинга инфраструктур и оценки экологических рисков.

Ключевые слова:

Оптический поток, БПЛА, аэрофотосъемка, сегментный анализ, структурное сходство,

пространственное моделирование, визуализация данных, алгоритм Фарнебака, управление рисками, обработка изображений

Работы выполнены в рамках реализации проекта "Разработка методологии формирования инструментальной базы анализа и моделирования пространственного социально-экономического развития систем в условиях цифровизации с опорой на внутренние резервы" (FSEG-2023-0008)

Введение

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) в последние годы стали ключевыми инструментами сбора данных для мониторинга природной среды, инфраструктурных объектов и динамически изменяющихся территорий. Высокое пространственное и временное разрешение аэрофотоснимков, получаемых с БПЛА, требует разработки новых алгоритмов анализа, способных эффективно интерпретировать сложные пространственно-временные закономерности.

Одним из наиболее перспективных подходов является анализ оптического потока, который позволяет оценивать смещение объектов между последовательными изображениями. Однако большинство традиционных алгоритмов ограничены в своей способности выявлять устойчивые структурные и направленные паттерны движения, особенно в условиях сложных и неоднородных текстур, характерных для городской застройки, сельскохозяйственных участков или природных ландшафтов. Более того, существующие решения зачастую не учитывают пространственный контекст между регионами анализа, что снижает их интерпретируемость и точность.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью создания автоматизированных методов анализа движения, ориентированных не только на расчёт величины скорости, но и на выявление направлений, устойчивости и закономерностей потоков. В рамках данной работы предложен подход, сочетающий вычисление плотного оптического потока с графовым анализом смежности сегментов и построением тепловых карт средней и медианной скорости.

В отличие от существующих решений, акцент сделан на использовании медианных значений как устойчивой метрики, а также на представлении полученных данных в виде направленных графов, отражающих пространственные связи между сегментами. Это позволяет локализовать зоны с высокой активностью, оценить преобладающие направления движения и идентифицировать потенциальные аномалии.

Целью настоящего исследования является разработка интерпретируемого и вычислительно эффективного инструмента анализа направленного движения на аэрофотоснимках, полученных с БПЛА. Предложенная методология ориентирована на прикладные задачи экологического мониторинга, выявления изменений городской инфраструктуры и оценки рисков на основе пространственно-временных характеристик движения.

Апробация подхода выполнена на синтетических данных, моделирующих сложную текстурную сцену. Построенные тепловые карты, графы смежности и сравнительные диаграммы позволили не только визуализировать характер движения, но и количественно оценить его закономерности. Полученные результаты подтверждают практическую применимость метода и обосновывают его перспективность для задач интеллектуального анализа аэрофотосъёмки.

Анализ теоретического базиса

Методы оптического потока традиционно используются для оценки движения между последовательными изображениями и активно применяются в задачах компьютерного зрения. Среди них наиболее известными являются подход Лукаса–Канаде, предполагающий локальную линейность перемещения [2], и метод Фарнбака, основанный на полиномиальной аппроксимации интенсивности [3]. Последний позволяет получать плотное векторное поле движения и демонстрирует высокую устойчивость к изменениям текстур, что делает его особенно подходящим для анализа аэрофотоснимков с высоким разрешением, включая данные, получаемые с БПЛА.

Однако, несмотря на широкое распространение этих методов, их применение в задачах пространственно-временного анализа с БПЛА сопряжено с рядом ограничений. В частности, большая часть существующих исследований сосредоточена на глобальных характеристиках движения, таких как средняя скорость по кадру или вектор доминирующего направления [6]. Такой подход не учитывает важные локальные закономерности и не позволяет выявлять специфические зоны активности, например, участки с аномальной динамикой или направленным сдвигом объектов инфраструктуры.

Современные нейросетевые методы анализа движения, включая модели глубокого обучения [4, 5], обеспечивают высокую точность, но требуют значительных вычислительных ресурсов и обширных обучающих выборок. Эти требования не всегда выполнимы в условиях реального времени и ограниченных мощностей автономных БПЛА. Вследствие этого сохраняется актуальность лёгких и интерпретируемых алгоритмов, которые можно внедрить в полевых условиях без предварительного обучения.

Кроме того, анализ движения, как правило, выполняется без учёта пространственных связей между сегментами изображения. Такой подход ограничивает возможности детектирования направленности потоков и устойчивых паттернов перемещения. Между тем, задачи мониторинга природных и техногенных процессов требуют именно пространственно-информированного подхода — с выделением направлений, устойчивых регионов, зон изменения структуры движения и зон высокой динамической активности [7].

Существующие подходы анализа оптического потока часто не позволяют в полной мере учитывать пространственно-временные закономерности движения объектов на сложных текстурных фонах, что затрудняет автоматизированный анализ данных, поступающих с БПЛА [8, 9]. В связи с этим требуется разработка методологии, способной проводить количественное исследование направленности и интенсивности движения на аэрофотоснимках с высокой детализацией, что обеспечит более точное моделирование динамики изменений в природных и антропогенных процессах.

Предложенный в данной работе подход решает указанные проблемы за счёт:

- локального анализа скорости на уровне сегментов изображения;
- сопоставления каждого сегмента с соседними по восьми направлениям;
- вычисления устойчивых метрик — медианной и средней величины скорости;
- построения графа смежности, в котором узлы кодируют тайлы, а рёбра — связи и направление движения;
- визуализации тепловых карт и статистического распределения скорости для пространственной интерпретации.

Таким образом, обоснована необходимость перехода от традиционного анализа «кадр-к-кадру» к структурированному и контекстуально-информированному исследованию, ориентированному на решение прикладных задач в сфере экосистемного мониторинга, оценки состояния инфраструктуры и раннего выявления отклонений в поведенческих характеристиках объектов наблюдения.

Методология

Для анализа динамики на серии аэрофотоснимков применён метод плотного оптического потока, реализованный с использованием алгоритма Фарнбака. Каждый снимок разбивался на регулярную сетку сегментов (тайлов) размером 1000×750 пикселей с перекрытием 30%. Сопоставление тайлов происходило по восьми направлениям: слева, справа, сверху, снизу и по диагоналям. Для каждой пары соседних сегментов вычислялось векторное поле смещений, на основе которого определялись характеристики движения.

Основной метрикой выступал модуль вектора скорости в каждой точке изображения:

$$M(x, y) = \sqrt{u(x, y)^2 + v(x, y)^2} \quad (1)$$

где $u(x, y)$ и $v(x, y)$ — горизонтальная и вертикальная компоненты смещения.

Для получения сводных оценок внутри сегмента рассчитывались среднее и медианное значения:

$$\bar{M} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N M_i \quad (2)$$

$$M_{\text{med}} = \text{median}(M_i) \quad (3)$$

где N — количество пикселей в сегменте, M_i — значение скорости в i -й точке.

Для пространственного анализа использовались следующие процедуры:

- Расчёт направленных средних значений между центральным тайлом и его соседями;
- Построение тепловых карт для визуализации распределения скоростей в координатной системе изображения;
- Формирование графа смежности, где вершины соответствуют сегментам, рёбра — их связям, а цвет узлов отражает уровень движения.

Полученные значения визуализировались следующими способами:

- Тепловая карта средней скорости позволила локализовать области с выраженным движением;
- Тепловая карта медианной скорости дополнена анализом, обеспечив устойчивость к шуму и выбросам;
- Boxplot-график дал возможность оценить разброс значений скоростей между всеми сегментами и сравнить поведение средней и медианной оценки;
- Граф смежности позволил выявить локальные кластеры движения и траектории распространения изменений в сцене.

В качестве входных данных использовалось синтетически сгенерированное изображение, имитирующее смешанную сцену с элементами городской застройки,

пустынной области и регулярной структуры.

Результаты

Для апробации разработанной методики было сгенерировано тестовое изображение, моделирующее структуру городской среды и хаотичного движения объектов (рисунок 1). Слева изображена "урбанистическая пустыня" — зона с высокоразреженными структурами, а справа — плотная сетка с повторяющимися узорами, имитирующими городскую решётку.

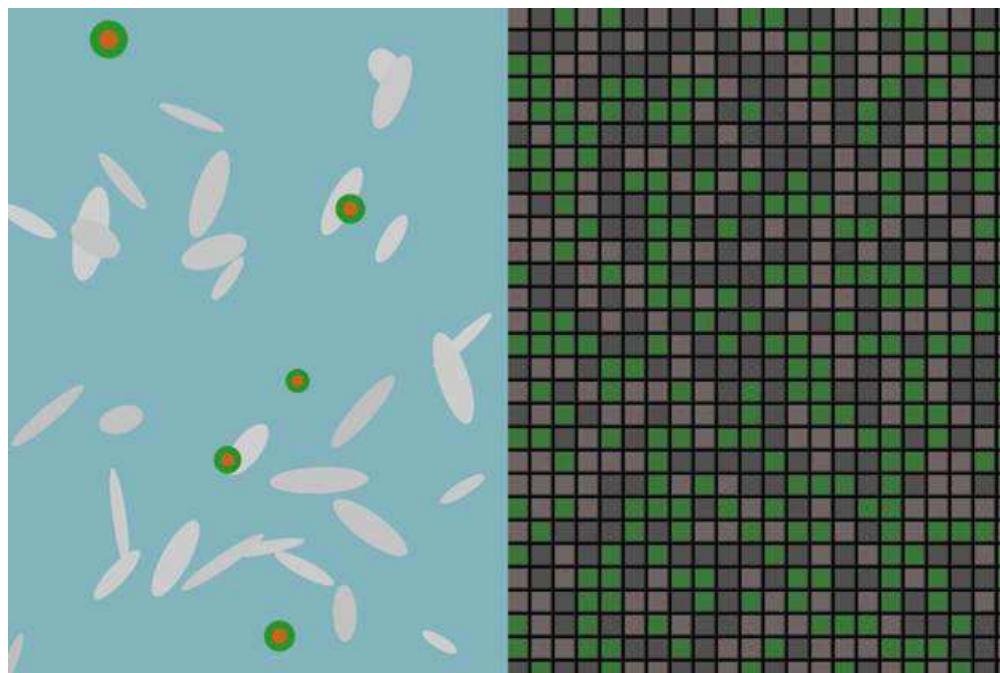


Рисунок 1 – Синтетическое изображение для анализа движения ("урбанистическая пустыня")

Для анализа изображения оно было разрезано на равномерную сетку сегментов. На основе плотного оптического потока между сегментами были вычислены значения векторной скорости, после чего проведено агрегирование по средним и медианным значениям. Пространственное распределение средней и медианной скорости визуализировано с помощью тепловых карт (рисунок 2 и 3). Численные значения скорости приведены непосредственно на клетках.

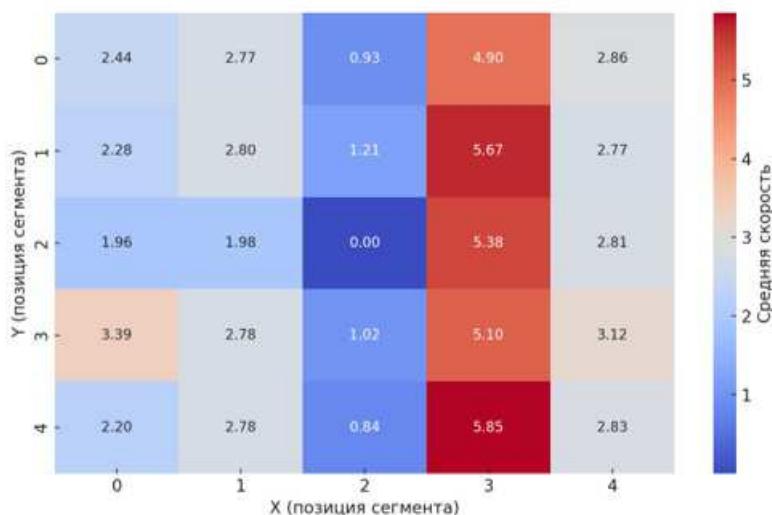


Рисунок 2 – Тепловая карта средней величины скорости с подписями

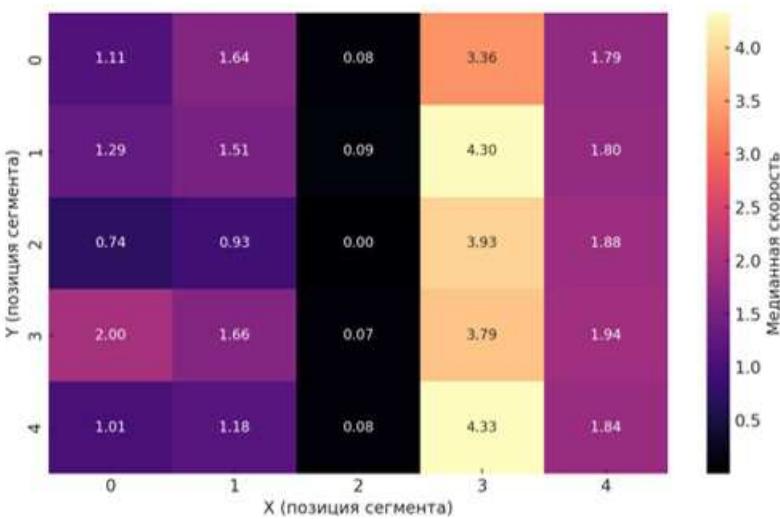


Рисунок 3 – Тепловая карта медианной величины скорости с подписями

Анализ показал, что максимальные скорости наблюдаются в центральных вертикальных регионах изображения, где происходят наибольшие смещения, в то время как по краям движение значительно слабее. При этом медианная скорость оказывается менее подвержена выбросам, что подтверждает её устойчивость как метрики.

Для дополнительного сравнения двух метрик — средней и медианной скоростей — были построены диаграммы размаха (boxplot), отражающие статистическое распределение значений (рисунок 4). Можно заметить, что распределение средней скорости шире, содержит больше выбросов, в то время как медианная скорость более концентрирована.

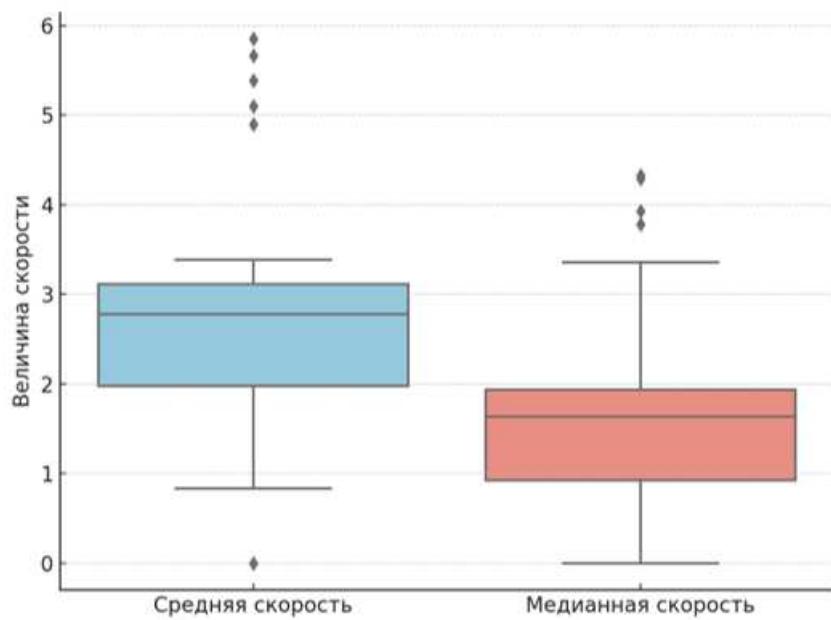


Рисунок 4 – Сравнение распределений средней и медианной скорости (диаграммы размаха)

Для анализа связности между сегментами построен граф смежности, в котором каждая вершина соответствует тайлу изображения, а рёбра – соседним участкам. Окраска вершин отражает среднюю скорость на соответствующем участке (рисунок 5). Данный подход позволяет наглядно отразить зоны локальных аномалий движения, а также выделить сегменты с высокой плотностью активности.

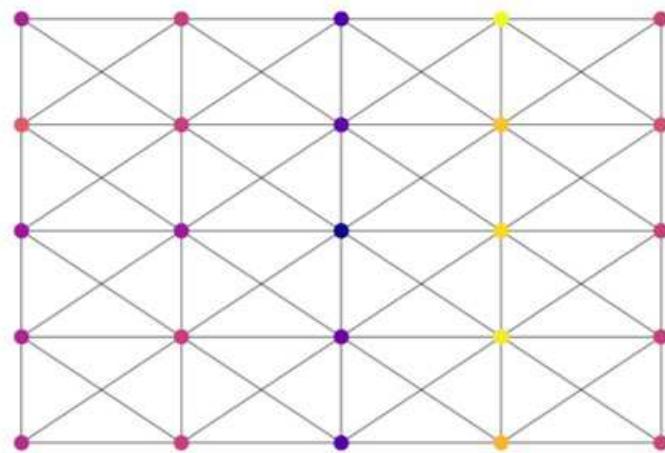


Рисунок 5 – Граф смежности сегментов с окраской по средней скорости

Представленные визуализации позволяют не только количественно оценить динамику движения на изображении, но и провести пространственный анализ закономерностей. Обнаруженные области с резкими перепадами скорости могут быть интерпретированы как зоны с потенциальными изменениями в текстуре или физической активности объектов.

Заключение

Разработанная методика анализа пространственно-временных закономерностей движения на аэрофотоснимках представляет собой вычислительно эффективный и интерпретируемый подход, адаптированный для условий ограниченных ресурсов

автономных БПЛА^[12]. В отличие от ранее предложенных решений, ориентированных преимущественно на структурное сравнение изображений^[10,11], данная методология делает акцент на количественном анализе направления и интенсивности движения, используя плотный оптический поток, вычисляемый по методу Фарнебака.

Ключевым преимуществом предложенного подхода является локальный анализ движения на уровне сегментов изображения с последующим сопоставлением данных по восьми направлениям. Это позволяет не только оценить общую динамику сцены, но и выявлять устойчивые паттерны перемещений, а также локализованные аномалии. Применение графового представления сегментов и построение инфографики (граф смежности, тепловые карты, boxplot-сравнение) позволили значительно расширить возможности интерпретации результатов.

Метод не требует предварительного обучения и отличается высокой устойчивостью к шуму, что делает его применимым в различных условиях съёмки. Это особенно важно для задач мониторинга инфраструктуры, оценки рисков в природной среде, а также анализа техногенных процессов. Полученные результаты подтвердили, что использование медианных и средних характеристик оптического потока обеспечивает надёжную оценку уровня движения даже при наличии мелкомасштабных и локализованных изменений.

Тем не менее, метод сохраняет чувствительность к резким освещённым переходам и текстурным деформациям, что ограничивает его точность в условиях экстремальных визуальных изменений. Эти ограничения могут быть преодолены за счёт дальнейшей интеграции с адаптивными алгоритмами, включая методы машинного обучения, а также при использовании дополнительных источников информации (например, мультиспектральных каналов или температурных карт).

Таким образом, представленная методология может быть эффективно применена в интеллектуальных системах управления надёжностью и мониторинга территорий, обеспечивая не только регистрацию изменений, но и формирование оснований для принятия решений на основе выявленных закономерностей движения.

Библиография

1. Гибсон, Дж. Дж. Восприятие визуального мира / Дж. Дж. Гибсон. – Бостон: Houghton Mifflin, 1950. – 235 с.
2. Лукас, Б. Д., Канаде, Т. Итеративная техника регистрации изображений с применением к стереоизображениям. В: Труды 7-й Международной совместной конференции по искусственноому интеллекту; 1981. С. 674-679.
3. Фарнебак, Г. Оценка движения по двум кадрам на основе полиномиального разложения. В: Труды 13-й Скандинавской конференции по анализу изображений (SCIA); 2003. С. 363-370. DOI: 10.1007/3-540-45103-X_50.
4. Сан, Д., Рот, С., Блэк, М. Дж. Секреты оценки оптического потока и их принципы. В: Конференция IEEE по компьютерному зрению и распознаванию образов (CVPR); 2010. С. 2432-2439. DOI: 10.1109/CVPR.2010.5539939.
5. Досовицкий, А., Фишер, П., Ильг, Е., Хауссер, П., Хазирбас, Ч., Гольков, В., Смакт, П., Кремерс, Д., Брокс, Т. FlowNet: Обучение оптическому потоку с помощью сверточных сетей. В: Международная конференция IEEE по компьютерному зрению (ICCV); 2015. С. 2758-2766. DOI: 10.1109/ICCV.2015.316. EDN: YDBQRF.
6. Брокс, Т., Бруhn, А., Папенберг, Н., Вайкетт, Дж. Высокоточная оценка оптического потока на основе теории искажений. В: Европейская конференция по компьютерному

- зрению (ECCV); 2004. С. 25-36. DOI: 10.1007/978-3-540-24673-2_3.
7. Адиль, О., Махраз, М. А., Риффи, Дж., Тайри, Х. Достижения в оценке оптического потока на основе глубокого обучения: Всесторонний обзор моделей и технологий. В: Шестая международная конференция по интеллектуальным вычислениям в науках о данных (ICDS); 2024 окт. С. 1-7. IEEE.
8. Хричанюк, О., Свитенко, М., Крыхтин, Ю., Ахафонов, Ю., Авилов, А., Капашин, М. Программно-аппаратный комплекс для автоматической геотеггирования фотографий, сделанных с беспилотного летательного аппарата. В: 7-я международная конференция IEEE по актуальным проблемам разработки беспилотных летательных аппаратов (APUAVD); 2024 окт. С. 276-279. IEEE.
9. Хорн, Б. К. П., Шунк, Б. Г. Определение оптического потока. Искусственный интеллект. 1981; 17(1-3): 185-203. DOI: 10.1016/0004-3702(81)90024-2.
10. Павленко, Б. В., Пикалев, Я. С. Методика создания набора аэрофотоснимков для задачи перекрестной геолокализации // Проблемы искусственного интеллекта. – 2024. – № 4(35). – С. 101-112. – DOI 10.24412/2413-7383-2024-4-101-112. EDN: DZMGUB.
11. Галиверов, А. Н., Городничая, А. Н. Особенности использования БПЛА при эффективном сборе аэрофотоснимков в градостроительстве // Инновации. Наука. Образование. – 2022. – № 50. – С. 1822-1826. EDN: BKJZFH.
12. Дюкарев, Е. А., Воропай, Н. Н., Макаров, С. А. Пространственное разрешение аэрофотоснимков БПЛА. В: Применение беспилотных летательных аппаратов в географических исследованиях: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Иркутск, 22-23 мая 2018 года / Ответственный редактор С.А. Макаров. – Иркутск: Институт географии им. В.Б. Сочавы Сибирского отделения Российской академии наук, 2018. – С. 64-66. EDN: YAVELR.

Результаты процедуры рецензирования статьи

В связи с политикой двойного слепого рецензирования личность рецензента не раскрывается.

Со списком рецензентов издательства можно ознакомиться [здесь](#).

Тема:

Анализ пространственно-временных закономерностей движения на аэрофотоснимках с использованием оптического

потока

Журнал: Программные системы и вычислительные методы

Данная статья "Анализ пространственно-временных закономерностей движения на аэрофотоснимках с

использованием оптического потока" во многом повторяет другую статью, представленную и положительно

рецензированную в данном журнале "Программные системы и вычислительные методы", а именно: "Метод

автоматизированного анализа аэрофотоснимков с БПЛА для управления надежностью технических систем на основе

структурного сравнения изображений и пространственно-инвариантного сопоставления ключевых точек".

Видимо автору нужны публикации в журналах ВАК для общего количества. Можно было бы объединить обе статьи

общим содержанием.

Тема БПЛА безусловно актуальна, как в военном, так и в гражданском применении.

На основе проверки в системе Антиплагиат, цель работы перефразирована как "создание эффективного

инструмента оценки направленности и интенсивности движения, что позволит выявлять структурные

закономерности изменений в природных и техногенных процессах". Объектом исследования тоже являются

изображения аэрофотосъемки высокого разрешения, получаемые с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), а

предметом исследования - методы их сравнения и анализа для оценки динамики изменений окружающей среды и

предсказания рисков. Актуальность исследования обусловлена аналогично другой статье "возрастающей

потребностью в автоматизированных методах обработки данных, позволяющих детально анализировать

пространственно-временные характеристики движения объектов".

Анализ теоретического базиса включает всего лишь 8 источников и только зарубежных авторов, что недостаточно

для научной статьи уровня журнала ВАК.

Рис. 1 полностью дублирует такое же сгенерированное тестовое изображение для апробации из вышеуказанной

статьи с разбиением на 56 сегментов. Методика анализа тоже включает те же известные метрики, что и в другой

статье - индекс структурного сходства Structural Similarity Index Measure (SSIM) и стандартное

статистическое среднеквадратическое отклонение Mean Squared Error (MSE).

Статья изложена грамотным техническим языком, понятным читательской аудитории в

данной предметной области.

Структура оформления материала, цель, задачи, литературный обзор, дискуссия, заключение, библиография,

оформлены в соответствии с требованиями журнала "Программные системы и вычислительные методы".

Замечания во многом повторяют другую статью:

1. Формулы не пронумерованы и их качество "как картинки" оставляет желать лучшего.
2. Разделителем целой и дробной части в русском языке должна быть запятая, например 0.5–2.5 неправильно.
3. Объем библиографии из 9 источников недостаточен для научной статьи в журнале уровня ВАК.
4. В библиографии ссылка № 1 содержит неполную информацию об издании.

Общий вывод: статья не рекомендуется к публикации в журнале "Программные системы и вычислительные методы" по вышеуказанным причинам.

Результаты процедуры повторного рецензирования статьи

В связи с политикой двойного слепого рецензирования личность рецензента не раскрывается.

Со списком рецензентов издательства можно ознакомиться [здесь](#).

Статья посвящена разработке метода анализа пространственно-временных закономерностей движения объектов на аэрофотоснимках, полученных с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Основное внимание уделено применению алгоритма оптического потока для выявления направлений, устойчивости и аномалий движения, что актуально для задач экологического мониторинга, оценки инфраструктуры и раннего обнаружения изменений.

Автор предлагает комбинированный подход, включающий:

1. Разбиение изображений на сегменты (тайлы) с последующим анализом оптического потока по методу Фарнбака.
2. Вычисление средних и медианных значений скорости для каждого сегмента, что повышает устойчивость к шумам.
3. Построение тепловых карт и графов смежности для визуализации пространственных закономерностей.
4. Использование синтетических данных для апробации метода.

Методология отличается детальной проработкой, сочетанием количественных и качественных методов анализа, а также ориентацией на практическое применение в условиях ограниченных ресурсов БПЛА.

Исследование отвечает на вызовы современности: рост использования БПЛА требует эффективных алгоритмов обработки больших объемов данных. Актуальность подчёркивается необходимостью автоматизированного мониторинга динамических процессов в урбанизированных и природных средах. Работа заполняет нишу между сложными нейросетевыми методами и упрощёнными подходами, предлагая баланс точности и вычислительной эффективности.

Ключевые нововведения:

- Локальный анализ движения на уровне сегментов с учётом восьми направлений смежности.

- Применение медианных значений скорости как устойчивой метрики.
- Графовое представление данных для выявления пространственных связей и аномалий. Новизна подтверждается отсутствием аналогов, сочетающих такие методы в контексте анализа аэрофотоснимков.

Статья написана ясным академическим стилем, с чёткой логикой изложения: от постановки проблемы до апробации результатов. Структура включает все необходимые разделы: введение, теоретическую базу, методологию, результаты, заключение и библиографию. Визуализации (тепловые карты, графы) дополняют текст, делая его более наглядным. Единственное замечание — отсутствие реальных данных для валидации, но это компенсируется качеством синтетического эксперимента.

Автор демонстрирует, что предложенный метод эффективен для анализа движения, устойчив к шумам и применим в реальных условиях. Подчёркивается потенциал для интеграции с адаптивными алгоритмами, такими как машинное обучение, что открывает направления для будущих исследований.

Статья будет полезна:

- Исследователям в области компьютерного зрения и обработки изображений.
- Специалистам по мониторингу окружающей среды и урбанистики.
- Разработчикам ПО для БПЛА, заинтересованным в оптимизации алгоритмов.

Практическая ориентированность и доступность изложения расширяют целевую аудиторию.

Статья представляет собой завершённое исследование с высокой научной и практической ценностью. Методология обоснована, результаты воспроизводимы, а выводы убедительны. Рекомендую статью к публикации в журнале «Программные системы и вычислительные методы» без доработок.