

УДК 004.932.72

DOI: [10.26102/2310-6018/2026.61.10.003](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2026.61.10.003)

Обоснование высоты установки камеры и стратегии сопровождения пешеходов в зависимости от плотности потока

И.А. Никашов✉

*Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых,
Владимир, Российская Федерация*

Резюме. В работе рассматривается выбор высоты установки камеры и стратегии сопровождения пешеходов – по ограничивающим прямоугольникам тела или головы – в зависимости от плотности потока. Высота установки и наблюдаемая часть тела при заданной плотности потока во многом задают окклюзию в кадре и тем самым ограничивают достижимое качество многообъектного сопровождения еще до выбора алгоритма. Качество измеряется интегральной метрикой сопровождения высшего порядка, а для каждой стратегии оценивается минимальная высота установки, при которой это качество достигает заданного уровня. Оценка выполнена на синтетических видеопоследовательностях, которые воспроизводят реальный пешеходный поток при управляемой геометрии съемки, недостижимой на натурных записях с заранее заданным ракурсом. Вычислительный эксперимент охватывает шесть высот установки от 2 до 12 м и диапазон плотности от свободного движения до плотного потока. Для сопровождения по телам требуемая высота монотонно растет с плотностью и в плотных режимах выходит за практический предел, тогда как сопровождение по головам обеспечивает то же качество на высоте не более 6 м. Полученная зависимость применима на этапе проектирования систем видеонаблюдения для согласования высоты установки и стратегии наблюдения с ожидаемой плотностью потока.

Ключевые слова: многообъектное сопровождение, установка камеры, высота установки, плотность пешеходного потока, окклюзия, сопровождение по головам, имитационное моделирование, видеонаблюдение.

Для цитирования: Никашов И.А. Обоснование высоты установки камеры и стратегии сопровождения пешеходов в зависимости от плотности потока. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2026;14(10). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/article?id=2560> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.61.10.003

Justification of camera mounting height and pedestrian tracking strategy as a function of flow density

I.A. Nikashov✉

*Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs, Vladimir,
the Russian Federation*

Abstract. The choice of camera mounting height and pedestrian tracking strategy – by body or head bounding boxes – is examined as a function of flow density. The mounting height and the observed body part govern mutual occlusions in the image and thereby cap the achievable quality of multi-object tracking before any tracker is chosen. Quality is measured by an integral higher-order tracking metric, and for each strategy the minimum mounting height at which this quality reaches a target level is estimated. The estimation uses synthetic video sequences that reproduce a real pedestrian flow under controllable acquisition geometry that is unattainable in field recordings with a predetermined viewpoint. The computational experiment spans six mounting heights from 2 to 12 m and a density range from free flow to dense flow. For body tracking the required height grows monotonically with

density and exceeds the practical limit in dense regimes, whereas head tracking attains the same quality at a height of no more than 6 m. The obtained dependence is applicable at the design stage of video surveillance systems for matching the mounting height and observation strategy to the expected pedestrian flow density.

Keywords: multi-object tracking, camera placement, mounting height, pedestrian density, occlusion, head tracking, simulation modeling, video surveillance.

For citation: Nikashov I.A. Justification of camera mounting height and pedestrian tracking strategy as a function of flow density. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2026;14(10). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/article?id=2560> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.61.10.003

Введение

Многообъектное сопровождение пешеходов составляет основу интеллектуальных функций систем охранного телевидения, транспортной аналитики и управления безопасностью массовых мероприятий [1]. Качество сопровождения, измеряемое интегральной метрикой высшего порядка (Higher-Order Tracking Accuracy – HOTA) [2], определяется не только алгоритмом сопровождения, но и геометрией установки камеры и выбором наблюдаемой части тела пешехода, которые задают зону видимости и пиксельную плотность изображения, а также влияют на распределение окклюзии. Поскольку ожидаемую плотность пешеходного потока можно заранее оценить по назначению и площади зоны наблюдения, выбор высоты установки камеры и стратегии наблюдения формирует предел достижимого качества еще до настройки алгоритмических компонентов трекера. Отсюда вытекает практическая потребность в обоснованной рекомендации по высоте установки и стратегии сопровождения, согласованной с ожидаемой плотностью потока.

Высоту и угол установки камеры традиционно выбирают по геометрическому покрытию зоны наблюдения и требованиям к размеру изображения цели. Рекомендации Р 78.36.002-2010¹ задают минимальный размер изображения объекта на экране для его обнаружения, различения и опознания, а методы оптимизации размещения камер [3, 4] обеспечивают наилучшее покрытие заданной зоны. Оба подхода опираются на разрешение и геометрию покрытия, но не на плотность потока и не оценивают качество последующего сопровождения, тогда как именно плотность, повышая окклюзию, ограничивает достижимое качество.

Со стороны алгоритмов сопровождения геометрия съемки либо оценивается из видеопотока и учитывается трекером [5], либо обходится переходом на сопровождение по головам, которые реже перекрываются в плотной толпе [6, 7]. В этих работах геометрия установки задана исходными видеоданными и не выступает управляемой переменной, поэтому они улучшают качество на конкретных наборах данных, но не дают переносимого правила выбора высоты установки и стратегии наблюдения под ожидаемую плотность потока. Систематически варьировать геометрию установки позволяют синтетические среды, воспроизводящие пешеходный поток по модели социальной силы [8], а практически значимые режимы плотности очерчены наборами данных для плотных и высоко расположенных сцен [9, 10]. Тем самым на этапе проектирования отсутствует обоснованная количественная зависимость минимальной высоты установки и предпочтительной стратегии сопровождения от плотности потока. Решение этой задачи и составляет предмет настоящей работы.

Минимальная высота установки камеры, обеспечивающая заданное качество HOTA, определяется как функция плотности потока, что и образует методику выбора высоты установки и стратегии сопровождения на этапе проектирования

¹ Р 78.36.002-2010. *Выбор и применение систем охранных телевизионных*. Москва: ФГУ НИЦ «Охрана» МВД России; 2010. 183 с.

информационно-управляющей системы видеонаблюдения. Зависимость получена имитационным моделированием на шести высотах от 2 до 12 м и семи уровнях плотности. Сравниваются две стратегии – сопровождение по телам и по головам – при фиксированной стойке камеры, наведении оптической оси в опорную точку в центре зоны на высоте середины корпуса пешехода и идеальном детекторе.

Материалы и методы

Чтобы независимо варьировать высоту установки камеры при неизменной модели сцены и фиксированной плотности потока, нужен управляемый источник видеопоследовательностей, какого нет на реальных наборах данных с заранее заданной геометрией съемки [1, 9]. Поэтому применен генератор сцен², в котором геометрия установки, плотность потока и стратегия наблюдения управляются независимо, а обнаружения получают проективным преобразованием известных положений агентов. Благодаря этому наблюдаемые изменения качества можно отнести напрямую к геометрии установки и плотности потока.

Динамика пешеходов не синтезируется, а заимствуется из разметки последовательности MOT17-04 [1] и переносится в синтетическую сцену – прямоугольную зону 20×15 м, ограниченную стенами. Поскольку исходная разметка задана в плоскости изображения, траектории восстанавливаются обратной проекцией ограничивающих прямоугольников на плоскость земли³ в предположении плоского пола и контакта стоп у нижней грани прямоугольника. Каждый агент движется по своей траектории-шаблону с темпом, унаследованным от нее и ограниченным характерной скоростью пешехода, а взаимодействие агентов между собой и со стенами моделируется методом социальной силы [8], что предотвращает наложение траекторий при высокой плотности. Каждая последовательность длится 900 кадров, что соответствует тридцати секундам при частоте 30 кадров в секунду.

Управляющим параметром служит плотность потока ρ . На сцене площадью 300 м² плотность принимает семь значений 0,10; 0,20; 0,30; 0,40; 0,60; 0,80 и 1,00 чел./м². По шкале уровней обслуживания пешеходных потоков (level of service – LOS) для пешеходных дорожек согласно Highway Capacity Manual, приведенной в работе Buchmueller S., Weidmann U.⁴, выбранные плотности отвечают уровням от А (свободное движение, до 0,18 чел./м²) до Е (поток с ограничениями, 0,71–1,33 чел./м²). Верхнее значение 1,00 чел./м² – наибольшая плотность, при которой генератор воспроизводит на сцене такого размера устойчивое движение потока без неестественных наложений агентов. Она приходится на верхнюю часть уровня Е, непосредственно перед уровнем F (свыше 1,33 чел./м²), где равномерное пешеходное движение сменяется прерывистым, старт-стопным. Это предел устойчивого, равномерного движения, а не плотность полной остановки толпы. Заторные режимы не рассматриваются, поскольку индивидуальное сопровождение в них практически недостижимо [9]. Для целей настоящей работы существенна не скоростная характеристика толпы, а окклюзия, растущая с плотностью потока.

Геометрия установки камеры задается единственным параметром – высотой установки H_c – и показана на Рисунке 1. Камера размещается на стойке у короткой стороны зоны с фиксированным горизонтальным удалением $D_c = 20$ м от центра сцены,

² Никашов И.А. *Генератор сцен для оценки и сравнения треков*: заявл. 27.10.2025; опубл. 30.10.2025. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025689708 Российская Федерация.

³ Никашов И.А. *Программа калибровки камеры и репроекции пешеходных траекторий через трёхмерную модель сцены*: заявл. 23.04.2026; опубл. 07.05.2026. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026663499 Российская Федерация.

⁴ Buchmueller S., Weidmann U. *Parameters of pedestrians, pedestrian traffic and walking facilities. IVT-Report Nr. 132*. Zürich: Institute for Transport Planning and Systems, ETH Zürich; 2006. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000047950>

одинаковым для всех конфигураций. Это удаление соответствует примеру типовой установки камеры в ведомственном документе Р 78.36.002-2010. Оптическая ось направляется в фиксированную опорную точку – центр зоны наблюдения на высоте середины корпуса пешехода, единую для всех агентов. При среднем росте взрослого человека $h = 1,65$ м [11] эта высота равна $h/2 = 0,825$ м, что определяет угол наклона оптической оси вниз,

$$\theta(H_c) = \arctan \frac{H_c - h/2}{D_c} = \arctan \frac{H_c - 0,825}{20}. \quad (1)$$

Соотношение (1) выражает элементарную геометрию наведения камеры. В справочном приложении того же документа приведен пример установки камеры на высоте 6 м с горизонтальной дальностью 20 м и углом наклона $14,5^\circ$. Этот угол отвечает наведению оптической оси на высоту около 0,83 м, то есть примерно на середину роста человека, и согласуется с соотношением (1). Этот пример задает калибровку точки наведения оптической оси, а не ограничение высоты установки. Тот же документ рекомендует наклон оптической оси к горизонту не более 15° , чему при $D_c = 20$ м отвечают высоты установки до 6 м. Высоты выше этой нормы включены намеренно, поскольку в плотном потоке требуемая для сопровождения по телам высота превосходит 6 м, и диапазон доведен до $H_c = 12$ м, чтобы определить требуемую высоту во всем рассматриваемом диапазоне плотности. Сцена визуализируется перспективной камерой с вертикальным полем зрения 40° и кадром высотой 1080 пикселей. С ростом высоты увеличиваются наклонная дальность до опорной точки наведения $R = \sqrt{D_c^2 + (H_c - h/2)^2}$ и ракурсное укорочение, поэтому пиксельная высота изображения пешехода на опорной дальности снижается от 122 до 93 пикселей, примерно на четверть, что отражает естественную потерю разрешения при высокой установке. Голова представлена сферой. По антропометрическим данным среднее отношение высоты головы к росту составляет 0,13 [12], поэтому радиус сферы принят равным 0,065 от роста с ограничением $[0,10; 0,13]$ м. При среднем росте 1,65 м диаметр сферы составляет около 0,21 м. Пиксельная высота головы примерно в семь раз меньше – порядка 13–17 пикселей, – и именно этот малый размер ограничивает точность обнаружения при сопровождении по головам. Проекция в эксперименте идеальна, без радиальной дисторсии.

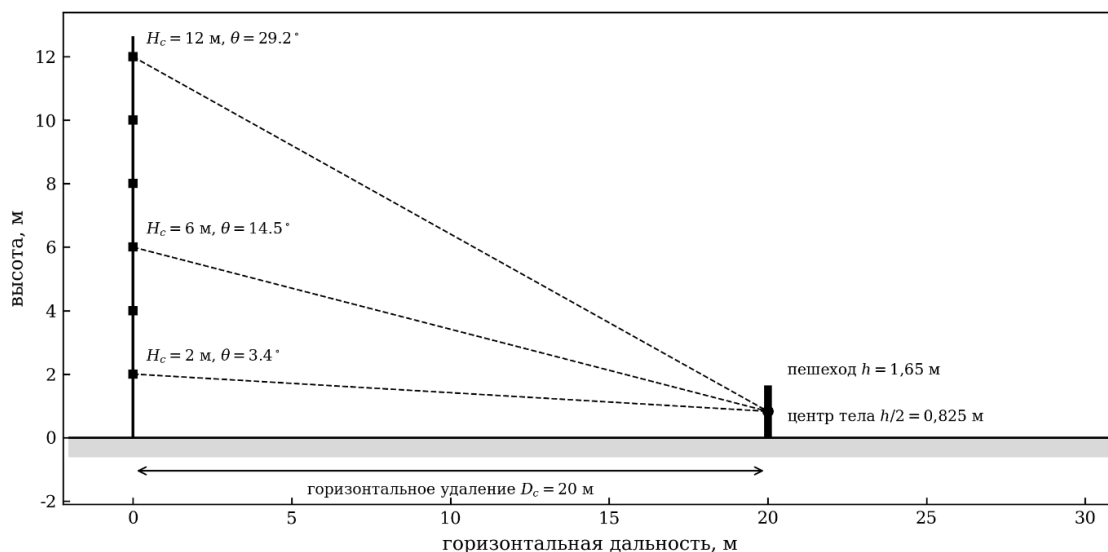


Рисунок 1 – Геометрия установки камеры
Figure 1 – Camera mounting geometry

Рассматриваются две стратегии с общей архитектурой трекера. Первая сопровождает агентов по ограничивающим прямоугольникам тел, вторая – по прямоугольникам голов. Сопровождение выполняет OC-SORT [13] – трекер на основе фильтра Калмана с наблюдательно-центрической коррекцией движения, развивающий алгоритм SORT [14]. OC-SORT сопоставляет прогноз положения с обнаружениями по геометрической мере пересечения прямоугольников (Intersection over Union – IoU) и не использует обучаемых признаков внешнего вида, что сохраняет прозрачную геометрическую природу сопоставления и изолирует влияние высоты установки от настройки модели внешности. В сравнении с ByteTrack [15], также геометрическим и не использующим признаков внешнего вида, наблюдательно-центрическая коррекция OC-SORT точнее восстанавливает траектории малоразмерных прямоугольников голов, что и определило выбор именно этого трекера. При идеальном детекторе, когда все обнаружения имеют единичную достоверность, ассоциация сводится к сопоставлению по IoU, и трекер выступает прозрачным геометрическим ассоциатором. Конфигурация трекера принята единой для обеих стратегий, что исключает его настройку из числа смешивающих факторов при сравнении сопровождения по телу и по голове.

Источником обнаружений служит идеальный детектор – истинный ограничивающий прямоугольник передается трекеру, если относительная видимость агента не ниже 0,25, и отбрасывается в противном случае. Видимость вычисляется попиксельно по результату визуализации сцены и равна доле пикселей силуэта агента (тела или головы по выбранной стратегии), не перекрытых другими агентами. Такой детектор устраняет случайную составляющую ошибок обнаружения и выявляет вклад геометрии установки и стратегии наблюдения в качество сопровождения, изолируя его от особенностей конкретного детектора.

Качество сопровождения измеряется метрикой HOTA [2]. Значение HOTA равно среднему из значений $HOTA_{\alpha}$ по набору порогов локализации α от 0,05 до 0,95 с шагом 0,05:

$$HOTA = \text{avg}_{\alpha} HOTA_{\alpha}, \quad HOTA_{\alpha} = \sqrt{\text{Det}_{\alpha} \cdot \text{Ass}_{\alpha}}, \quad (2)$$

где α – пороговое значение меры пересечения прямоугольников, при котором эталонный прямоугольник сопоставляется с прямоугольником обнаружения, а Det_{α} и Ass_{α} – отвечающие этому порогу составляющие точности обнаружения и ассоциации. Раздельный анализ составляющих Det_{α} и Ass_{α} позволяет проследить, за счет какой стадии – обнаружения или ассоциации – одна стратегия превосходит другую.

Для каждой плотности потока определяется минимальная высота установки, при которой качество сопровождения по выбранной стратегии достигает заданного порога T:

$$H_c^{\min}(\rho; T) = \min\{H_c: HOTA(H_c, \rho) \geq T\}. \quad (3)$$

Значение $H_c^{\min}$ оценивается линейной интерполяцией HOTA между соседними высотами отдельно для каждой стратегии при порогах $T \in \{0,85; 0,90\}$. Порог 0,90 принят основным как уровень, при котором ошибки обнаружения и смены идентификаторов остаются единичными, а качество траекторий достаточно для последующей аналитики. Порог 0,85 привлечен как менее строгая граница, показывающая чувствительность требуемой высоты к выбору целевого качества. Если порог не достигается ни на одной из проверенных высот, принимается $H_c^{\min} > 12$ м. Для тела это значение задает основную рекомендацию по установке, для головы – показывает, насколько такая стратегия смягчает требование к высоте установки. Для каждой пары «высота – плотность» эксперимент повторяется при десяти различных начальных состояниях генератора псевдослучайных чисел. Доверительный интервал

минимальной высоты $H_c^{\min}$ оценивается бутстрэпом по этим десяти реализациям – 10^4 повторов с возвращением, для каждого из которых положение точки пересечения порога пересчитывается по усредненной кривой НОТА. Полный объем кампании составляет 840 запусков трекера.

Результаты

Зависимость качества сопровождения от высоты установки показана на Рисунке 2. Сопровождение по телам сильно зависит от высоты. При наибольшей проверенной плотности $\rho = 1,0$ чел./м² (уровень обслуживания Е) качество по телам растет от 0,22 при 2 м до 0,846 [0,831; 0,861] при 12 м, не достигая порога 0,85, тогда как качество по головам на той же плотности изменяется лишь от 0,40 до 0,99 и уже при умеренной высоте установки близко к максимуму. В разреженных режимах (уровень А) обе стратегии работают вблизи идеала на всех высотах.

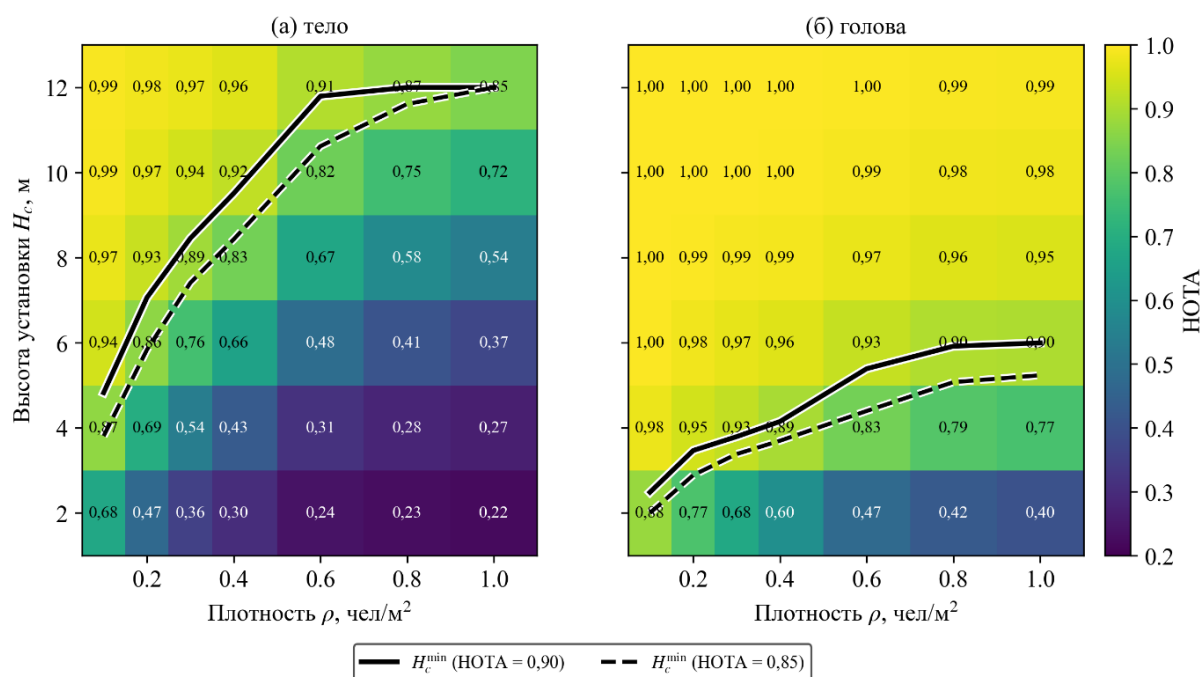


Рисунок 2 – Карта качества НОТА по высоте установки и плотности потока для сопровождения: а – по телам; б – по головам

Figure 2 – NOTA quality map as a function of mounting height and pedestrian flow density for tracking: а – body tracking; б – head tracking

Главный результат – зависимость минимальной высоты установки $H_c^{\min}$, обеспечивающей целевое качество сопровождения по телам, от плотности потока. Как показано в Таблице 1, с ростом плотности требуемая высота монотонно возрастает. Для качества НОТА не ниже 0,90 она поднимается от 4,8 м при свободном движении (уровень А) до 9,5 м при умеренной плотности (уровень С) и 11,8 м ближе к плотному потоку (уровень D), а в плотных режимах (уровень Е) выходит за рассмотренный предел 12 м. Сопровождение по головам достигает того же качества на существенно меньшей высоте – не выше 6,0 м во всем диапазоне плотности – и в плотных режимах остается единственной стратегией, удерживающей целевое качество в пределах рассмотренных высот.

Высоты в Таблице 1 также определены по формуле (3) для целевых уровней качества 0,85 и 0,90. Для каждого уровня обслуживания взят наибольший узел

плотности, попадающий в него. Обозначение > 12 означает, что порог не достигается на высотах до 12 м. Для сопровождения по головам приведен только порог 0,90 – эта стратегия достигает его на высоте не выше 6 м во всех режимах, поэтому менее строгий порог 0,85 не уточняет требуемую высоту. Для сопровождения по телам порог 0,85 показан дополнительно, поскольку вблизи предела осуществимости выбор целевого качества смещает требуемую высоту на 1,0–1,3 м, а на уровне Е тело не достигает и порога 0,85.

Таблица 1 – Минимальная высота установки камеры по уровням обслуживания потока для качества сопровождения не ниже заданного, м

Table 1 – Minimum camera mounting height by pedestrian level of service for tracking quality at or above a target level, m

Уровень обслуживания	ρ , чел./м ²	Тело		Голова
		НОТА $\geq 0,85$	НОТА $\geq 0,90$	НОТА $\geq 0,90$
А – свободное движение	0,10	3,8 [3,7; 3,9]	4,8 [4,6; 5,0]	2,5 [2,3; 2,7]
В – устойчивое	0,20	5,8 [5,6; 6,2]	7,1 [6,6; 7,5]	3,5 [3,4; 3,6]
С – умеренная	0,40	8,4 [8,1; 8,7]	9,5 [9,3; 9,7]	4,2 [4,0; 4,4]
Д – плотный поток	0,60	10,6 [10,4; 10,9]	11,8 [11,6; 12,0]	5,4 [5,3; 5,5]
Е – с ограничениями	1,00	> 12	> 12	6,0 [5,9; 6,3]

Обсуждение

Различие стратегий при низкой установке камеры определяется составляющей обнаружения. Она падает при усилении взаимного перекрытия силуэтов, которое растет с плотностью потока и убывает с ростом высоты установки. Поскольку головы малы и расположены выше уровня плеч, при наклонном обзоре сверху они реже оказываются друг за другом. При $\rho = 1,0$ чел./м² и высоте установки 2 м сильно перекрытые тела отсекаются порогом видимости, и сопровождение по телам имеет $\text{DetA} = 0,15$, тогда как менее перекрытые головы сохраняют $\text{DetA} = 0,50$ при сопоставимой ассоциативной составляющей. С подъемом камеры перекрытие тел убывает, и более крупный прямоугольник тела восстанавливает составляющую обнаружения, что и позволяет сопровождению по телам достигать целевого качества при достаточной высоте. Раздельные значения составляющих приведены в Таблице 2. Они показывают, что роль составляющих меняется с высотой. При 2 м ассоциативные составляющие обеих стратегий различаются менее чем на 0,001 и равны 0,327, поэтому все различие создает обнаружение. С ростом высоты обнаружение по телам восстанавливается быстрее ассоциации, и, начиная с 6 м, основной вклад в сохраняющееся превосходство головы дает уже ассоциативная составляющая.

Таблица 2 – Составляющие метрики НОТА для сопровождения по телам и по головам при плотности потока 1,00 чел./м²

Table 2 – NOTA components for body and head tracking at a flow density of 1.00 person/m²

Высота установки, м	DetA, тело	AssA, тело	DetA, голова	AssA, голова
2	0,150	0,327	0,496	0,327
4	0,235	0,302	0,878	0,674
6	0,431	0,320	0,953	0,850
8	0,634	0,453	0,978	0,932
10	0,794	0,644	0,986	0,972
12	0,892	0,802	0,989	0,988

Вывод устойчив к деталям постановки. Замена основного трекера OC-SORT на также геометрический ByteTrack [15] почти не меняет качество по телам – в среднем по всем сочетаниям высоты и плотности $|\Delta\text{НОТА}|$ составляет 0,009 при наибольшем значении 0,078 – и слабо снижает его по головам, где среднее снижение равно 0,051, а наибольшее – 0,073. Преимущество сопровождения по головам сохраняется и при изменении порога видимости в пределах от 0,15 до 0,40 – в разреженных режимах минимальная высота установки для голов смещается при этом не более чем на 0,8 м. Вместе с тем при идеальном детекторе полученные высоты остаются оптимистичными ориентирами. Реальный детектор теряет перекрытые тела чаще модельного порога и хуже обнаруживает малые прямоугольники голов, а у верхней границы плотности межагентная кинематика воспроизведена из разреженной исходной последовательности. Кроме того, моделируется лишь окклюзия между пешеходами, тогда как статические объекты сцены создают дополнительную окклюзию и в реальной обстановке могут увеличивать требуемую высоту. Поэтому полученные высоты установки задают идеализированную нижнюю границу требуемой высоты, достижимую лишь в пределе идеального детектора. В реальных условиях требуемая высота не меньше расчетной и в общем случае превышает ее.

Оценить сдвиг требуемой высоты при переходе к реальному детектору в рамках настоящей постановки нельзя, поскольку модельный порог отсекает объект детерминированно, тогда как у обучаемого детектора вероятность пропуска нарастает с перекрытием постепенно и зависит от обучающей выборки. Направление сдвига тем не менее определено однозначно. Реальный детектор пропускает часть объектов, которые модельный порог сохраняет, и потому при той же геометрии снижает составляющую обнаружения, что компенсируется только подъемом камеры. Для сопровождения по головам к этому добавляется малый пиксельный размер цели, поэтому у головной стратегии сдвиг ожидается больше, чем у телесной, и приведенное в Таблице 1 преимущество головы следует рассматривать как верхнюю оценку. Количественная оценка сдвига требует отдельной экспериментальной кампании с реальным детектором.

Горизонтальное удаление стойки в эксперименте зафиксировано, однако, согласно выражению (1), высота установки и удаление входят в геометрию наблюдения совместно, через угол наклона оптической оси. Поэтому полученную зависимость допустимо читать как правило для угла наклона, а не для высоты как таковой. При другом удалении та же геометрия наблюдения достигается на высоте, для которой превышение оптической оси над опорной точкой наведения меняется пропорционально удалению. Так, при удалении 30 м вместо 20 м приведенное в Таблице 1 значение для уровня С возрастает с 9,5 до примерно 13,8 м. Перенос остается приближенным, поскольку с ростом удаления увеличивается наклонная дальность и падает пиксельный размер цели, из-за чего действительная требуемая высота несколько превышает оценку по углу наклона.

Методика применима на этапе проектирования систем видеонаблюдения. Задавшись ожидаемым уровнем обслуживания потока, проектировщик определяет по Таблице 1 минимальную высоту установки для сопровождения по телам и сопоставляет ее с конструктивно достижимой, а при выходе требуемой высоты за практический предел отдает предпочтение сопровождению по головам. Так, на распространенной для охранных камер высоте 4 м в свободном движении обе стратегии близки, однако в плотном потоке сопровождение по головам резко превосходит сопровождение по телам, поэтому при умеренной высоте установки и повышенной плотности потока оно предпочтительно по умолчанию.

Заключение

В работе предложена и экспериментально проверена методика выбора высоты установки камеры и стратегии сопровождения пешеходов на этапе проектирования по ожидаемой плотности потока. Установлено, что минимальная высота установки, обеспечивающая заданное качество сопровождения по телам, монотонно растет с плотностью и в плотных режимах выходит за практический предел высоты установки, тогда как сопровождение по головам достигает того же качества на существенно меньшей высоте и в плотных режимах остается единственной работоспособной стратегией. Тем самым выбор наблюдаемой части тела и высоты установки при заданной плотности потока задает достижимый предел качества сопровождения еще до выбора алгоритма. Конкретные значения минимальной высоты по уровням обслуживания потока сведены в таблицу рекомендаций (Таблица 1).

Методика дополняет действующие нормативные эвристики выбора параметров установки, опирающиеся на разрешение и геометрическое покрытие, метрикой качества сопровождения и связывает геометрию установки с окклюзией, которая убывает с ростом высоты установки и возрастает с плотностью потока. Полученная зависимость применима при проектировании систем видеонаблюдения для совместного выбора высоты установки и стратегии сопровождения под ожидаемый режим плотности и переносится на смежные задачи подсчета и аналитики поведения толпы.

Дальнейшие исследования связаны с переходом от идеального детектора и трекара без признаков внешнего вида к реальному детектору и сопоставлению по внешнему виду, что позволит учесть не моделируемое в настоящей постановке снижение качества повторной идентификации при съемке сверху, а также с распространением методики на режимы затора, варьированием горизонтального удаления стойки и формы зоны наблюдения и валидацией зависимости на реальных наборах данных с высоко расположенными камерами.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Milan A., Leal-Taixé L., Reid I., Roth S., Schindler K. *MOT16: A benchmark for multi-object tracking*. arXiv. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1603.00831> [Accessed 15th May 2026].
2. Luiten J., Ošep A., Dendorfer P., et al. HOTA: A higher order metric for evaluating multi-object tracking. *International Journal of Computer Vision*. 2021;129(11):548–578. <https://doi.org/10.1007/s11263-020-01375-2>
3. Erdem U.M., Sclaroff S. Automated camera layout to satisfy task-specific and floor plan-specific coverage requirements. *Computer Vision and Image Understanding*. 2006;103(3):156–169. <https://doi.org/10.1016/j.cviu.2006.06.005>
4. Волхонский В.В., Ковалевский В.А. Метод оптимизации параметров установки камеры для видеоконтроля зоны наблюдения произвольной формы. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2023;23(5):927–934. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-5-927-934>
Volkhonskiy V.V., Kovalevskiy V.A. Method for optimization of camera installation parameters for video monitoring of arbitrary surveillance zone. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2023;23(5):927–934. (In Russ.). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-5-927-934>
5. Limanta F., Uto K., Shinoda K. CAMOT: Camera angle-aware multi-object tracking. In: *Proceedings of the 2024 IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*, 03–08 January 2024, Waikoloa, HI, USA. IEEE; 2024. P. 6465–6474. <https://doi.org/10.1109/WACV57701.2024.00635>

6. Sundararaman R., De Almeida Braga C., Marchand E., Pettré J. Tracking pedestrian heads in dense crowd. In: *Proceedings of the 2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 20–25 June 2021, Nashville, TN, USA. IEEE; 2021. P. 3864–3874. <https://doi.org/10.1109/CVPR46437.2021.00386>
7. Zhang Y., Chen H., Lai Zh., Zhang Z., Yuan D. Handling heavy occlusion in dense crowd tracking by focusing on the heads. In: *AI 2023: Advances in Artificial Intelligence: 36th Australasian Joint Conference on Artificial Intelligence: Part I*, 28 November – 01 December 2023, Brisbane, QLD, Australia. Singapore: Springer; 2023. P. 79–90. https://doi.org/10.1007/978-981-99-8388-9_7
8. Helbing D., Molnár P. Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E*. 1995;51(5):4282–4286. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.51.4282>
9. Dendorfer P., Rezatofighi H., Milan A., et al. MOT20: A benchmark for multi object tracking in crowded scenes. arXiv. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2003.09003> [Accessed 15th May 2026].
10. Simsek F.E., Cigla C., Kayabol K. SOMPT22: A surveillance oriented multi-pedestrian tracking dataset. arXiv. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2208.02580> [Accessed 15th May 2026].
11. NCD Risk Factor Collaboration (NCD-RisC). A century of trends in adult human height. *eLife*. 2016;5:e13410. <https://doi.org/10.7554/eLife.13410>
12. Mather G. Head-body ratio as a visual cue for stature in people and sculptural art. *Perception*. 2010;39(10):1390–1395. <https://doi.org/10.1068/p6737>
13. Cao J., Pang J., Weng X., Khirrodar R., Kitani K. Observation-centric SORT: Rethinking SORT for robust multi-object tracking. In: *Proceedings of the 2023 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 17–24 June 2023, Vancouver, BC, Canada. IEEE; 2023. P. 9686–9696. <https://doi.org/10.1109/CVPR52729.2023.00934>
14. Bewley A., Ge Z., Ott L., Ramos F., Upcroft B. Simple online and realtime tracking. In: *Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 25–28 September 2016, Phoenix, AZ, USA. IEEE; 2016. P. 3464–3468. <https://doi.org/10.1109/ICIP.2016.7533003>
15. Zhang Y., Sun P., Jiang Y., et al. ByteTrack: Multi-object tracking by associating every detection box. In: *Computer Vision – ECCV 2022: 17th European Conference: Part XXII*, 23–27 October 2022, Tel Aviv, Israel. Cham: Springer; 2022. P. 1–21. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20047-2_1

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Никашов Илья Алексеевич, аспирант, **Пя А. Nikashov**, Postgraduate, Vladimir State
Владимирский государственный университет University named after A.G. and N.G. Stoletovs,
имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Vladimir, the Russian Federation.
Российская Федерация.
e-mail: inikashov@vlsu.ru

*Статья поступила в редакцию 03.07.2026; одобрена после рецензирования 23.09.2026;
принята к публикации 05.10.2026.*

*The article was submitted 03.07.2026; approved after reviewing 23.09.2026;
accepted for publication 05.10.2026.*