

Санкт-Петербург
2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ДАЛЬНОСТИ ВИДИМОСТИ	6
1.1. Основные понятия и определения.....	6
1.2. Классификация и обзор методов измерения МДВ	10
1.3 Углубленный анализ трансмиссионного метода	16
1.4 Современные направления в мониторинге видимости	20
Вывод по главе 1	28
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ МАКЕТА ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА МДВ	29
2.1. Выбор и сравнительный анализ основных электронных компонентов ...	29
2.2. Разработка оптической системы и подбор излучателя	34
2.3. Методика минимизации фоновой засветки и калибровки прибора.....	43
2.4 Программная реализация и управление измерениями	52
2.5. Оценка метрологических характеристик макета	60
Вывод по главе 2	65
ГЛАВА 3. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ РАЗРАБОТАННОГО МАКЕТА	67
3.1. Области предполагаемого использования прибора.....	67
3.2. Концепция функционирования устройства в сетевой экосистеме интернета вещей	71
3.3. Возможности дальнейшего усовершенствования конструкции прибора	74
3.4. Алгоритмические методы повышения достоверности измерений и идентификации метеоявлений	78
Вывод по главе 3	84
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	86
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	88

ПРИЛОЖЕНИЕ А	92
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	94

ВВЕДЕНИЕ

Безопасность и эффективность функционирования современного транспорта – воздушного, морского и наземного – напрямую зависят от своевременного и точного метеорологического обеспечения. В структуре метеорологических данных одним из наиболее критических параметров, определяющих безопасность и регулярность движения, является метеорологическая дальность видимости (МДВ). Данный параметр характеризует максимальное расстояние, на котором наблюдатель может различить и идентифицировать объект на фоне неба.

Точная и оперативная информация о дальности видимости жизненно необходима в авиации для принятия решений о взлёте и посадке воздушных судов, в судоходстве – для навигации в портах и прибрежных водах, а на автомобильном транспорте – для предупреждения водителей об опасных условиях, особенно в периоды тумана, дымки, дождя или снегопада.

За последние полтора десятилетия зафиксировано значительное количество аварий и катастроф, связанных с ухудшением видимости. Крупнейшими из них стали катастрофа самолёта Ту-154 под Смоленском 10 апреля 2010 года, приведшая к гибели 96 человек [3], и катастрофа вертолёт Ми-8 на Камчатке 31 августа 2024 года, унёсшая жизни 22 человек [14, 13]. Согласно статистике Комитета безопасности полётов Ассоциации вертолётной индустрии, с 2010 по 2021 год произошло 15 катастроф и 10 серьёзных инцидентов категории CFIT (столкновение с землёй в управляемом полёте) с вертолётами Ми-8/17, связанных с продолжением полёта в несоответствующих метеоусловиях, в результате чего погибло 108 человек [18].

На морском транспорте также фиксируются происшествия, такие как посадка на мель рыболовецкого судна у острова Парамушир из-за плохой видимости, повлёкшая существенные экономические потери [19]. На

автомобильных дорогах регулярно происходят массовые столкновения, в том числе с участием десятков транспортных средств, как в регионах России [10, 8, 4, 9, 11], так и за рубежом [7].

Традиционно оценка видимости осуществлялась визуально метеорологом-наблюдателем, что отличалось субъективностью и низкой дискретностью. Современные инструментальные методы, такие как использование промышленных трансмиссометров и нефелометров, обеспечивают высокую точность, однако их стоимость, монтаж и обслуживание остаются экономически недоступными для многих объектов: региональных аэродромов, вертолётных площадок, речных портов или систем мониторинга автомобильных дорог.

Параллельно с этим в последние годы отмечается стремительное развитие доступной микроконтроллерной электроники и прецизионных цифровых датчиков. Появление недорогих, но высокочувствительных компонентов, таких как цифровой датчик освещённости BH1750, открывает новые возможности для создания бюджетных измерительных систем. Адаптация подобной элементной базы для решения специализированных метрологических задач представляет собой актуальную научно-техническую проблему.

В связи с этим разработка макета оптического датчика дальности видимости на основе доступных компонентов, реализующего трансмиссионный метод измерения, и проведение его метрологической оценки является актуальной, своевременной и практически значимой задачей.

Целью выпускной квалификационной работы является разработка и метрологическая оценка макета оптического датчика дальности видимости, основанного на трансмиссионном методе и реализованного с применением микроконтроллера Arduino и цифрового датчика освещённости BH1750.

ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ДАЛЬНОСТИ ВИДИМОСТИ

Данная глава написана основываясь на документе ИКАО – «Руководств по практике наблюдения за дальностью видимости на ВПП и передачи сообщений о ней» [25] и действующий в России руководящий документ РД 52.21.680-2006 [16]. В этих документах содержатся основные понятия и наиболее точно описан физический процесс измерения видимости. В автомобильных, речных, морских и железнодорожных документациях не содержится точных определений видимости. Глава посвящена теоретическому анализу основных методов измерения МДВ, их классификации, принципам работы и сравнительным характеристикам. Особое внимание уделяется трансмиссионному методу, который выбран в качестве базового для разработки макета оптического датчика. Целью главы является обоснование выбора метода и определение ключевых параметров, влияющих на точность и надежность измерений.

1.1. Основные понятия и определения

Метеорологическая дальность видимости (МДВ) является одним из ключевых параметров, характеризующих состояние атмосферы, и как было написано в введении имеет первостепенное значение для обеспечения безопасности в авиации, морской навигации и на наземном транспорте. Корректное и своевременное измерение МДВ позволяет принимать оперативные решения, предотвращающие аварийные ситуации, особенно в сложных метеоусловиях, таких как туман, дымка, снегопад или пыльная буря.

1.1.1. Роль и определения метеорологической дальности видимости

Согласно определению Всемирной Метеорологической Организации (ВМО) и Международной организации гражданской авиации (ИКАО), метеорологическая дальность видимости – это Длина пути в атмосфере, создающая ослабление светового потока в коллимационном пучке при цветовой температуре 2700 К до 0,05 его первоначального значения [25, 16, 17].

На практике, метеорологом-наблюдателем, часто используется более раннее, визуальное определение: это наибольшее расстояние, с которого черный объект достаточно больших угловых размеров (более 15 угловых минут) виден и распознается на фоне неба у горизонта в дневное время; или наибольшее расстояние, в пределах которого могут быть видны и опознаны огни с интенсивностью приблизительно 1000 кандел (в российской практике часто используется несколько огней интенсивностью 100 кандел) [16] на неосвещенном фоне (в темноте) [25, 16, 17, 1].

Несмотря на кажущиеся различия, оба определения тесно связаны через фундаментальные законы ослабления света в атмосфере.

1.1.2 Физические основы ослабления света

Видимость в атмосфере ограничивается двумя основными процессами:

1. Рассеяние: изменение направления распространения света при его взаимодействии с частицами воздуха (молекулярное, или Рэлеевское рассеяние) и взвешенными в нем аэрозольными частицами – каплями воды, кристаллами льда (аэрозольное, или Ми-рассеяние); преобладает в таких явлениях как туман и снегопад [23].
2. Поглощение: преобразование энергии световой волны во внутреннюю энергию частиц (в основном, сажи, аэрозолей и некоторых газов); преобладает в условиях мглы или задымлённости [29].

Совокупное действие этих двух процессов называется экстинкцией или ослаблением света. Интенсивность этого ослабления описывается законом Бугера-Ламберта-Бера [17, 2].

Если коллимированный пучок света с начальной интенсивностью I_0 проходит через однородную среду, то его интенсивность I на расстоянии L будет равна:

$$I = I_0 \cdot e^{-\sigma L} \quad (1.1)$$

Где:

σ – коэффициент экстинкции (или натуральный показатель ослабления), имеющий размерность м^{-1} .

Коэффициент экстинкции σ является суммой коэффициента рассеяния β и коэффициента поглощения α :

$$\sigma = \beta + \alpha \quad (1.2)$$

В большинстве метеорологических условий (туман, дымка, чистый воздух) поглощение света в видимом диапазоне незначительно по сравнению с рассеянием ($\alpha \ll \beta$), поэтому с хорошей точностью можно принять $\sigma \approx \beta$. Исключение составляют ситуации с сильным задымлением или промышленным загрязнением, где сажа вносит заметный вклад в поглощение [23].

1.1.3. Формула Кошмидера и стандартизация расчетов

Связь МДВ и коэффициента экстинкции описывается формулой Кошмидера. Связь между субъективной визуальной оценкой видимости и объективным физическим параметром (коэффициентом экстинкции) была установлена Г. Кошмидером и А. Алларом [17].

Рассмотрим черный объект, наблюдаемый на фоне неба. Видимость объекта определяется его контрастом K_0 с фоном (небом). Данный контраст описывается выражением:

$$K_L = K_0 \cdot e^{-\sigma L} \quad (1.3)$$

Где:

K_L – собственный контраст объекта (для идеального черного объекта на фоне неба $K_0 \approx -1$);

L – расстоянии до объекта (м).

Человеческий глаз способен различить объект, пока его контраст с фоном превышает некую пороговую величину – пороговую контрастную чувствительность. Для дневного зрения эта величина в среднем принимается равной от 0,02 до 0,05.

МДВ, по определению, – это такое расстояние $L_{\text{МДВ}}$, на котором контраст K_L становится равным пороговому ϵ :

$$\epsilon = |K_0| \cdot e^{-\sigma L_{\text{МДВ}}} \quad (1.4)$$

Принимая $K_0 \approx 1$ (идеально черный объект) и решая уравнение относительно $L_{\text{МДВ}}$, получаем формулу Кошмидера (или Аллара):

$$L_{\text{МДВ}} = -\frac{\ln \epsilon}{\sigma} \quad (1.5)$$

ВМО и ИКАО стандартизировали значение порогового контраста $\epsilon = 0,05$ (5%) [25, 16, 17]. Тогда:

$$L_{\text{МДВ}} = -\frac{\ln \epsilon}{\sigma} \approx \frac{3,0}{\sigma} \quad (1.6)$$

Если же принять $\epsilon = 0,02$ (2%), что часто используется в инженерных расчетах и соответствует более "зоркому" наблюдателю, то:

$$L_{\text{МДВ}} = -\frac{\ln \epsilon}{\sigma} \approx \frac{3,9}{\sigma} \quad (1.7)$$

В данной работе, а также в большинстве современных измерителей, используется определение МДВ (или MOR), строго привязанное к инструментальному измерению порогового значения 5% ($L = 3,0 / \sigma$). Однако в российской метеорологической практике исторически закрепился пороговый контраст 2%, приводящий к формуле $L = 3,912 / \sigma$ [1]. Выбор конкретного коэффициента (3,0 или 3,912) является вопросом стандартизации и должен быть зафиксирован в методике расчета прибора. В рамках данной ВКР мы будем ориентироваться на российский стандарт ($\epsilon = 0,02$, $L = 3,912 / \sigma$) так как целевая аудитория – Росгидромет, РФ.

Таким образом, задача инструментального измерения МДВ сводится к задаче измерения коэффициента экстинкции σ .

1.2. Классификация и обзор методов измерения МДВ

Методы измерения МДВ можно разделить на две большие группы: визуальные (наблюдательные) и инструментальные.

Инструментальные методы основаны на измерении объективных физических характеристик, связанных с коэффициентом экстинкции σ . Основных методов два: трансмиссионный и нефелометрический (прямого рассеяния).

1.2.1 Визуальные методы

Исторически первый и самый простой метод. Он основан на наблюдении за набором объектов-ориентиров (здания, мачты, деревья, специально установленные щиты), расстояние до которых известно. Наблюдатель-метеоролог определяет, какой из наиболее удаленных объектов еще виден, а какой уже нет, и на основе этого делает вывод о текущей дальности видимости [17]. В темное время суток используются огни-ориентиры.

Такой метод имеет основное достоинств – простота (не требует оборудования кроме самих ориентиров).

Однако недостатков гораздо больше:

1. Субъективность. Сильно зависит от индивидуальных особенностей зрения наблюдателя, его психофизического состояния, опыта и погодных условий (например, слепящее солнце, сильный ветер).
2. Низкая дискретность. Точность ограничена расстояниями до ориентиров.
3. Низкая оперативность: Измерения проводятся с большим интервалом (например, раз в 30 минут на аэродроме или каждые 3 часа на метеостанциях).
4. Сложность в ночное время. Оценка видимости по огням сложнее и имеет иную физическую природу, чем по черным объектам.
5. Невозможность автоматизации.

В современной метеорологии и, тем более, в системах обеспечения безопасности, визуальные методы полностью уступили место инструментальным.

1.2.2 Трансмиссионный метод

Этот метод является прямым инструментальным воплощением закона Бугера-Ламберта-Бера. Прибор, реализующий этот метод, называется трансмиссометр [25, 16, 17, 1].

Принцип: измеряется ослабление интенсивности света при прохождении им известного расстояния (базы) L .

Устройство состоит из двух разнесенных блоков:

1. Излучатель. Формирует коллимированный (параллельный) пучок света известной и, что крайне важно, стабильной начальной интенсивности I_0 .
2. Приемник. Расположен на расстоянии L от излучателя, измеряет интенсивность I дошедшего до него света.

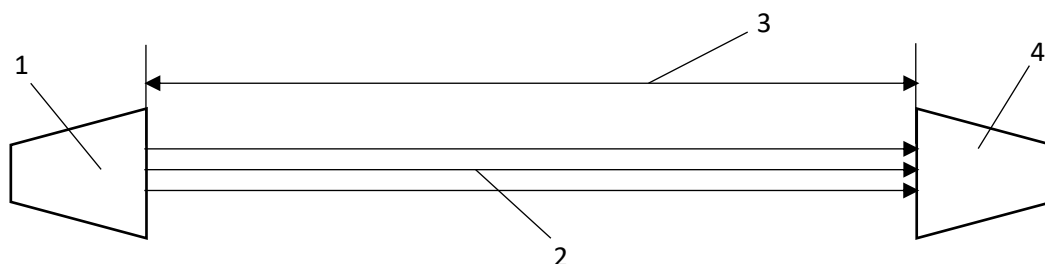


Рисунок 1.1 – Схема трансмиссометра

1 – Излучатель

2 – Коллимированный пучок света

3 – Базисная линия (расстояние от излучателя до приёмника)

4 – Приёмник

Расчет: в условиях идеальной видимости (чистый и прозрачный воздух) проводится калибровка, во время которой измеряется начальная (максимальная) интенсивность I_0 .

В рабочих условиях измеряется текущая интенсивность I .

Вычисляется коэффициент пропускания (прозрачность) как отношение полученных интенсивностей:

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (1.8)$$

Далее используя уравнение Бугера-Ламберта-Бера (1.1) можно получить:

$$T = e^{-\sigma L} \quad (1.9)$$

Из полученного уравнения находится коэффициент экстинкции:

$$\sigma = -\frac{\ln(T)}{L} \quad (1.10)$$

Зная σ , по формуле Кошмидера (1.6) вычисляется МДВ:

$$L_{\text{МДВ}} = \frac{3}{\sigma} = -\frac{3L}{\ln(T)} \quad (1.11)$$

Основные достоинства трансмиссометров:

1. Прямой физический метод измерения. Трансмиссометр измеряет общую потерю света (экстинкцию), вызванную как рассеянием, так и поглощением. В отличие от нефелометров, он не делает допущений о типе частиц. Если в воздухе присутствует темный дым или копоть, которые поглощают свет, трансмиссометр учтет это корректно, в то время как нефелометр может занижить плотность такой среды.
2. Интегральная оценка на линии (базе). Прибор измеряет прозрачность не в одной точке, а вдоль всей линии между излучателем и приемником (база L). Это позволяет усреднять локальные неоднородности тумана, давая более репрезентативную картину для пилота или водителя, движущегося по этой траектории.
3. Высокая точность в условиях сильных туманов. При низкой видимости (менее 500 м) сигнал ослабляется значительно, что позволяет трансмиссометру четко фиксировать изменения прозрачности. Именно поэтому они являются основным инструментом для обеспечения посадок по категориям CAT II и CAT III [25, 16].

4. Простота метрологической поверки. Для проверки точности прибора не нужны сложные аэрозольные камеры. Достаточно использовать набор нейтральных светофильтров с известным коэффициентом пропускания, которые устанавливаются перед объективом.

Основные недостатки трансмиссометров:

1. Сложность юстировки и монтажа. Для работы системы требуется идеальное соосное расположение блоков. Любое проседание грунта, вибрация или температурная деформация опор, смещающая луч на доли градуса, приводит к ложному сигналу о потере видимости. Это требует возведения массивных бетонных фундаментов.
2. Стоимость владения. Из-за двухблочной конструкции требуются затраты на прокладку кабелей между блоками (иногда на расстояние до 75–150 метров), установку двух комплектов опор и регулярное обслуживание оптики на обоих концах базы.
3. Габариты. Трансмиссометр требует выделенной полосы отчуждения вдоль ВПП или дороги.

1.2.3 Нефелометрический метод (метод прямого рассеяния)

Этот метод основан на измерении интенсивности света, рассеянного небольшим объемом воздуха. Такой прибор называется нефелометр.

Принцип: как было сказано в разделе 1.1, в большинстве случаев $\sigma \approx \beta$ (коэффициент рассеяния). В свою очередь, коэффициент β пропорционален интенсивности света, рассеянного частицами в данном объеме.

Устройство: Источник света (обычно ИК-светодиод или лазер) и приемник (фотодиод) размещены в одном корпусе. Их оптические оси пересекаются под определенным углом (например, 45°). Область пересечения пучков (т.н. "измерительный объем") имеет небольшой размер (доли литра). Приемник измеряет только тот свет, который был рассеян частицами, находящимися в этом объеме [12].

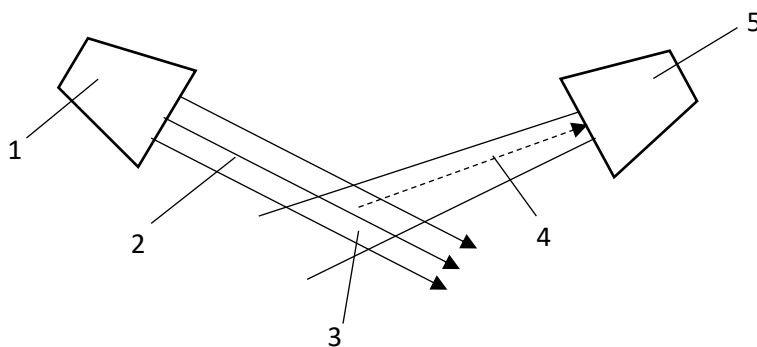


Рисунок 1.2 – Схема нефелометра

1 – Излучатель

2 – Излучаемый свет

3 – Измеряемый объем

4 – Свет, рассеянный частицами в измеряемом объеме

5 – Приемник

Расчет МДВ: интенсивность рассеянного света I пропорциональна коэффициенту рассеяния β :

$$I_{scat} = I_{source} \cdot C \cdot \beta \quad (1.12)$$

Где:

I_{scat} – интенсивность, зафиксированная датчиком;

I_{source} – интенсивность источника;

C – калибровочная константа (зависит от угла между осями и объема);

β – коэффициент рассеяния.

Нахождение коэффициента экстинкции если $\sigma \approx \beta$:

$$\sigma = \frac{I_{scat}}{I_{source} \cdot C} \quad (1.13)$$

Итоговая формула МДВ (при $\epsilon = 0,05$) исходя из формулы Кошмидера (1.6):

$$L_{\text{МДВ}} = \frac{3 \cdot I_{\text{source}} \cdot C}{I_{\text{scat}}} \quad (1.14)$$

Нефелометр имеет следующие достоинства:

1. Компактность (один блок, нет длинной базы).
2. Простота установки.
3. Хорошо измеряет как очень плохие, так и очень хорошие условия видимости.

Однако также у него есть и недостатки:

1. Точечное измерение. Прибор измеряет σ в очень малом объеме (размером с кружку). В условиях "пятнистого" тумана это может не отражать реальную видимость на трассе или ВПП.
2. Косвенный метод. Основан на допущении $\sigma \approx \beta$, которое неверно при наличии дыма или сажи.
3. Сложность калибровки. Требуется калибровочных газов или камер.

1.3 Углубленный анализ трансмиссионного метода

Поскольку в данной работе разрабатывается макет трансмиссометра, рассмотрим этот метод подробнее. Он является наиболее прямым и "честным" способом измерения σ , так как напрямую измеряет ослабление света на базе L .

1.3.1 Замена интенсивности на освещённость

В данной ВКР изначально было решено использовать датчик освещённости (люксметр) вместо измерителя интенсивности, поэтому следует доказать, что в уравнение Бугера-Ламберта и формуле Кошмидера можно использовать освещённость вместо интенсивности света.

Связь между силой света (интенсивностью) источника и освещенностью поверхности описывается фундаментальным законом фотометрии для точечного источника. Согласно этому закону, освещенность E прямо

пропорциональна силе света I и обратно пропорциональна квадрату расстояния L до источника [6]:

$$E = \frac{I}{L^2} \cdot \cos \theta \quad (1.15)$$

Где:

E – освещенность в точке приема (лк);

I – сила света (интенсивность) источника (кд);

L – расстояние от источника до датчика (м);

θ – угол падения лучей (в условиях макета с соосным расположением $\theta = 0$, следовательно, $\cos \theta = 1$).

Эта зависимость подтверждает, что освещенность поверхности является функцией интенсивности источника, масштабированной через геометрический фактор расстояния.

Обращаем внимание, что в трансмиссометрах соблюдаются условия стационарной оптической системы:

1. Фиксированная база. Расстояние L (длина оптического пути) между светодиодом и датчиком жестко задано конструкцией прибора и является константой ($L = \text{const}$).
2. Стабильность телесного угла. Так как использование коллимирующей трубки (тубуса) ограничивает световой поток, направляя его исключительно на светочувствительную площадь сенсора.
3. Линейность связи. Поскольку расстояние L неизменно, коэффициент $k = 1/L^2$ также является константой. Это устанавливает прямую линейную зависимость между измеряемой освещенностью и интенсивностью: $E = I * k$.

Математическое доказательство для закона Бугера:

Подставим зависимость $I = E / k$ в уравнение закона Бугера-Ламберта-Бера (1.1):

$$\frac{E}{k} = \frac{E_0}{k} \cdot e^{-\sigma L} \quad (1.16)$$

При нахождении относительного изменения интенсивности (коэффициента пропускания T) геометрический коэффициент k , учитывающий расстояние и закон обратных квадратов, сокращается:

$$T = \frac{E}{E_0} = \frac{I}{I_0} = e^{-\sigma L} \quad (1.17)$$

Таким образом, использование показаний датчика в люксах (E) математически эквивалентно использованию значений интенсивности (I), так как при вычислении показателя ослабления σ и последующем расчете МДВ по формуле Кошмидера (1.5) геометрические параметры системы сокращаются. Это подтверждает метрологическую адекватность применения цифрового люксметра в составе трансмиссометра.

1.3.2. Технические решения и ограничения промышленных трансмиссометров

Промышленные приборы (эталонным представителем которых является Vaisala LT31) представляют собой сложные оптико-электронные системы. Их высокая стоимость обусловлена необходимостью преодоления фундаментальных физических ограничений трансмиссионного метода.

Методы решения технических проблем [27]:

1. Стабилизация источника излучения. Для исключения дрейфа опорного сигнала I_0 применяются не просто мощные светодиоды, а системы с активной обратной связью. Внутри блока излучателя устанавливается контрольный фотодиод, который измеряет яркость лампы в реальном времени. Если яркость падает (из-за старения или температуры), электроника автоматически поднимает ток питания.

2. Селекция полезного сигнала (Борьба с засветкой). Главный враг трансмиссометра на открытом воздухе – солнце. Чтобы отличить «свой» свет от солнечного, применяется амплитудная модуляция. Источник вспыхивает с частотой, например, 1000 Гц. Приемник оснащен полосовым фильтром и синхронным детектором, который игнорирует любой постоянный свет (солнце, фары), реагируя только на пульсации заданной частоты.
3. Системы самоочистки и компенсации загрязнения. Поскольку приборы работают годами под дождем и снегом, их окна защищаются «воздушными ножами» (мощный обдув, препятствующий оседанию пыли) и подогревом. Кроме того, реализован алгоритм автоматической компенсации загрязнения (Window Contamination Compensation): прибор периодически измеряет рассеяние на собственных стеклах и вводит поправочный коэффициент в формулу Бугера.
4. Прецизионная механика и юстировка. На длинных базах (50–75 м) отклонение стойки всего на 0,1 градуса может привести к уходу луча мимо приемника. Поэтому промышленные блоки устанавливаются на массивные бетонные фундаменты глубиной ниже уровня промерзания грунта, а сами корпуса имеют микрометрические винты для сверхточной наводки.

Таблица 1.1 – Сравнительный анализ характеристик

Характеристика	Преимущества промышленного прибора	Недостатки промышленного прибора
Точность	Погрешность менее 2% во всем диапазоне.	Требуется ежегодной поверки специалистами.
Надежность	Работа в экстремальных условиях (-50...+50 °C).	Очень высокая стоимость запчастей.

Характеристика	Преимущества промышленного прибора	Недостатки промышленного прибора
Автономия	Полная автоматизация и самодиагностика.	Требует прокладки силовых и сигнальных кабелей в траншеях.
Метрология	Прямая прослеживаемость к государственным эталонам.	Габариты делают невозможным мобильное использование.

Таким образом, можно сказать, что все вышеперечисленные решения делают промышленные трансмиссометры эталоном точности и надежности, необходимым для категорийных аэродромов. Однако сложность их установки (фундаменты, юстировка) и цена (десятки тысяч долларов) создают свободную нишу для разработки упрощенных макетов и бюджетных датчиков, предназначенных для менее критических задач, таких как мониторинг автодорог или локальных вертолетных площадок.

Ещё раз подчеркну, что целью данной ВКР является не создание конкурирующего промышленного образца, а разработка макета для демонстрации принципа и оценки возможности создания бюджетной системы на основе современной доступной элементной базы.

Подход к разработке макета основан на максимальном упрощении конструкции по сравнению с промышленными образцами, с переносом "сложности" с аппаратной части на программную и на использование преимуществ современных цифровых датчиков.

1.4 Современные направления в мониторинге видимости

Несмотря на высокую точность и стандартизацию классических инструментальных методов, современное развитие информационных технологий и повсеместное распространение цифровой инфраструктуры

стимулируют поиск альтернативных подходов к оценке прозрачности атмосферы. Основным драйвером изменений в этой области выступает концепция интеллектуальных транспортных систем и необходимость создания сверхплотных сетей мониторинга, где стоимость одного узла должна быть на порядок ниже цены профессионального аэродромного оборудования. Переход от специализированных метеорологических станций к использованию существующих информационных каналов – от видеокамер до сигналов беспроводной связи – открывает новые возможности для оперативного прогнозирования опасных метеорологических явлений в масштабах целых регионов.

1.4.1 Нейросетевой мониторинг (на основе VENet)

В последние годы парадигма мониторинга дорожной обстановки смещается от использования дорогостоящих лазерных измерителей и оптических датчиков в сторону интеллектуальных систем компьютерного зрения. Современные подходы базируются на применении глубоких нейронных сетей, способных анализировать видеопоток с уже существующих камер дорожного наблюдения. Одно из наиболее перспективных направлений связано с методом слияния нескольких визуальных признаков, который позволяет модели учитывать не только интенсивность пикселей, но и структурные особенности изображения, такие как краевые эффекты и характеристики темного канала. Подобные комплексные архитектуры, например VENet [28], демонстрируют высокую точность оценки видимости даже в условиях переменной плотности тумана, поскольку они обучаются на обширных массивах реальных метеорологических данных, а не на синтетических выборках.

Интеграция таких решений в интеллектуальные транспортные системы (ИТС) обладает рядом неоспоримых преимуществ, прежде всего экономического и инфраструктурного характера. Использование стандартных камер видеонаблюдения для метеорологического мониторинга исключает

необходимость установки и обслуживания специализированных метеостанций на каждом участке трассы, что значительно снижает капитальные затраты. Более того, методы глубокого обучения обеспечивают высокую адаптивность: система способна самообучаться, повышая точность распознавания на конкретных ландшафтах и при различных условиях освещения, что недоступно традиционным физическим датчикам.

Однако внедрение видеоаналитики в реальном времени сопряжено с серьезными технологическими вызовами и ограничениями. Одной из ключевых проблем является высокая чувствительность системы к качеству и стабильности каналов связи. Для оперативной передачи видеопотока высокого разрешения в центры обработки данных требуется бесперебойная работа высокоскоростного интернета, что затруднительно реализовать на удаленных или горных участках автомагистралей. Кроме того, возникает конфликт вычислительных ресурсов при многозадачном использовании оборудования: если камера одновременно задействована для фиксации нарушений скоростного режима или распознавания номеров, дополнительная нагрузка по оценке видимости может привести к задержкам в обработке или снижению точности обеих функций.

С алгоритмической точки зрения использование большого количества камер создает колоссальную нагрузку на серверную инфраструктуру и нейросетевые мощности. Необходимость параллельной обработки сотен потоков требует значительных затрат на электроэнергию и высокопроизводительное оборудование (GPU-кластеры). Также нельзя игнорировать аппаратные ограничения самих камер, такие как загрязнение линз или деградация матрицы со временем, что может быть интерпретировано нейросетью как наличие тумана, приводя к ложным срабатываниям системы оповещения. Таким образом, несмотря на высокую эффективность, переход к полностью автоматизированному видеомониторингу требует комплексного решения вопросов сетевой стабильности и оптимизации вычислительных затрат.

1.4.2 Комбинированный радиолокационный метод

Другим значимым вектором развития современных систем мониторинга является интеграция данных дистанционного зондирования атмосферы с результатами традиционных наземных измерений. В условиях необходимости оперативного обеспечения авиации и наземного транспорта точными метеорологическими данными, всё большую актуальность приобретают методики вариационного согласования разнородной информации. Суть данного подхода заключается в уточнении пространственного распределения метеорологической дальности видимости (МДВ) путём объединения полей, полученных методом сплайновой интерполяции данных наземных станций, и полей, рассчитанных на основе радиолокационной отражательной способности. Использование метеорологических радиолокаторов позволяет значительно расширить зону мониторинга и получить детальное представление о состоянии атмосферы в каждой точке пространства с высоким временным разрешением [5].

Основным преимуществом комплексного использования радиолокационных и наземных данных является возможность формирования непрерывного поля видимости на больших территориях, что физически недоступно при использовании только дискретной сети метеостанций. Применение математических моделей вариационного анализа позволяет учитывать физико-географические и климатические особенности региона, а также нивелировать ошибки отдельных измерительных приборов. Это обеспечивает существенное повышение точности аппроксимации МДВ, сокращая среднюю абсолютную ошибку до значений в пределах 0,6–1,8 км.

Несмотря на технологическую эффективность, методика обладает рядом существенных ограничений и недостатков. Одной из ключевых проблем является стохастический характер радиолокационных данных, точность которых сильно зависит от фазового состояния осадков и распределения частиц в облаках по размерам. Присутствие зон с кучево-дождевой облачностью может приводить к критическим погрешностям в расчетах,

достигающим 100–150% от исходных величин, что делает метод менее надежным в условиях интенсивной конвекции. Кроме того, точность системы напрямую коррелирует с плотностью наземной наблюдательной сети: для достижения приемлемых результатов требуется наличие от 10 до 20 равномерно распределенных станций в исследуемом районе. Также стоит отметить инструментальный фактор – с увеличением дистанции от радиолокатора ошибки определения характеристик облачности возрастают, что ограничивает радиус эффективного действия системы. Таким образом, практическая реализация данного направления требует сложного алгоритмического обеспечения для усвоения данных и постоянного контроля за качеством работы как наземного, так и радиолокационного сегментов инфраструктуры.

1.4.3 Пассивная спектроскопия (димер кислорода)

В рамках развития систем дистанционного зондирования атмосферы отдельное внимание заслуживают пассивные спектроскопические методы, использующие естественное солнечное освещение. Одним из инновационных подходов является методика определения метеорологической дальности видимости (МДВ) на основе анализа полос поглощения димера кислорода (O_4) в видимом диапазоне спектра. Данный способ базируется на фундаментальных физических свойствах атмосферных газов: равномерное распределение кислорода по горизонтали позволяет использовать его концентрацию как естественный эталон для оценки оптического ослабления света аэрозолями и гидрометеорами. Регистрируя разность спектральных сигналов в горизонтальном и вертикальном направлениях, система способна с высокой точностью вычислять прозрачность атмосферы без применения активных излучателей [15].

Основным преимуществом данной технологии является её высокая автономность и отсутствие необходимости в создании сложной инфраструктуры с измерительными базами. Это обеспечивает

исключительную мобильность датчиков, позволяя размещать их на подвижных объектах или в труднодоступных районах, где установка классических трансмиссометров невозможна. Кроме того, метод исключает ошибки, связанные с субъективностью человеческого восприятия, и решает проблему неоправданной экстраполяции данных, характерную для точечных нефелометрических измерений. Благодаря возможности сканирования по всем азимутальным направлениям, такая система предоставляет полную пространственную картину видимости вокруг точки наблюдения.

Тем не менее, широкое внедрение спектроскопических методов мониторинга ограничивается рядом эксплуатационных факторов. Главным недостатком является строгая зависимость от времени суток: система эффективно функционирует только в дневные часы при наличии достаточного уровня рассеянного солнечного излучения. Технологический процесс также требует проведения обязательной предварительной калибровки в строго определенных метеоусловиях – при высоком солнце и безоблачном небе, что может быть затруднительно в регионах с преобладанием пасмурной погоды. Кроме того, использование высокочувствительных спектрометров повышает общую стоимость оборудования и предъявляет повышенные требования к чистоте оптических элементов, так как любое загрязнение линз будет вносить искажения в измеряемый спектр. Таким образом, несмотря на высокую научную ценность и точность, метод требует интеграции с другими типами датчиков для обеспечения круглосуточного и всепогодного мониторинга.

1.4.4 Мониторинг через сотовые сети

В контексте поиска альтернативных методов контроля атмосферных явлений всё больший интерес вызывает концепция использования существующей инфраструктуры сотовой связи как глобальной сети метеорологических датчиков. Данное направление базируется на анализе затухания микроволновых сигналов в радиорелейных линиях, связывающих базовые станции. Поскольку плотность тумана напрямую влияет на мощность

принимаемого радиосигнала, непрерывный мониторинг уровня этого сигнала позволяет восстанавливать пространственные поля видимости на больших площадях. В отличие от точечных оптических приборов, радиорелейные линии проводят измерения вдоль всей трассы распространения луча (от сотен метров до нескольких километров), что обеспечивает более репрезентативную оценку прозрачности атмосферы в приземном слое [24].

Преимуществом такого подхода является исключительная экономическая эффективность, обусловленная отсутствием необходимости в закупке и установке специализированного оборудования, так как телекоммуникационные сети уже развернуты и функционируют. Это позволяет получать оперативную информацию о видимости даже в тех районах, где установка классических метеостанций нецелесообразна. Кроме того, автоматизация процесса сбора данных исключает человеческий фактор и субъективность визуальных оценок, характерных для традиционных методов наблюдения. Переход современных сетей на высокие частоты (80 ГГц и выше) дополнительно расширяет возможности метода, позволяя фиксировать даже слабый туман, который ранее был недоступен для обнаружения радиочастотными средствами.

Однако использование сотовой инфраструктуры для метеомониторинга накладывает ряд ограничений, связанных с физическими особенностями распространения радиоволн и архитектурой самих сетей. Ключевой проблемой является зависимость качества мониторинга от плотности размещения вышек связи: если в урбанизированных районах сеть обеспечивает избыточное покрытие, то в сельской или горной местности редкое расположение станций не позволяет строить детализированные карты видимости. Существенным дестабилизирующим фактором выступает эффект «мокрой антенны», когда конденсирующаяся на поверхности оборудования влага вносит дополнительные искажения в сигнал, что может быть ошибочно интерпретировано как усиление тумана. Также система требует сложной математической фильтрации для исключения влияния других типов осадков,

таких как дождь или град, которые также вызывают затухание сигнала. Наконец, на данном этапе развития метод обеспечивает скорее оценочный, чем прецизионный характер измерений, что требует его обязательного сопоставления с референтными данными для повышения достоверности прогнозов.

Вывод по разделу 1.4

Анализ альтернативных подходов к мониторингу атмосферной прозрачности, таких как нейросетевые алгоритмы видеоаналитики, методы оптической спектроскопии и анализ затухания сигналов в сотовых сетях, позволяет выявить ряд существенных эксплуатационных ограничений. Несмотря на высокую потенциальную эффективность, данные методы зачастую требуют наличия дорогостоящей вычислительной инфраструктуры (серверов или специализированных графических процессоров для работы нейросетей) и стабильных высокоскоростных каналов связи для передачи видеопотоков. Кроме того, специализированные методы спектроскопии отличаются сложностью полевой калибровки, а данные, получаемые из сетей сотовой связи, носят преимущественно оценочный характер и зависят от плотности размещения базовых станций.

Выявленные недостатки формируют технологическую нишу для разработки простых, автономных и прямых методов измерения, обеспечивающих высокую точность при минимальных затратах на развертывание. Именно к таким решениям относится разрабатываемый в данной работе макет оптического трансмиссометра. Его преимущество заключается в способности функционировать в режиме реального времени без привязки к сложной внешней инфраструктуре, что делает его оптимальным инструментом для локального мониторинга метеоусловий на объектах, лишенных доступа к высокопроизводительным вычислительным сетям.

Вывод по главе 1

В ходе теоретического анализа методов и средств измерения метеорологической дальности видимости были детально изучены физические основы ослабления света в атмосфере и нормативно-правовая база, регламентирующая данные измерения. Установлено, что ключевым параметром для объективной оценки прозрачности среды является коэффициент экстинкции, связь которого с МДВ описывается фундаментальными законами Бугера-Ламберта-Бера и формулой Кошмидера. Выбор порогового контраста на уровне 5%, соответствующий международным стандартам ИКАО и ВМО, определен как наиболее адекватный для современных цифровых измерительных систем.

Сравнительный обзор существующих инструментальных методов показал, что, несмотря на активное развитие косвенных и нефелометрических подходов, трансмиссионный метод остается наиболее репрезентативным и точным, так как он напрямую фиксирует потерю интенсивности излучения на фиксированной оптической базе. В рамках главы было математически обосновано применение цифровых датчиков освещенности в качестве альтернативы измерителям интенсивности, что позволяет существенно упростить аппаратную архитектуру прибора без потери метеорологической адекватности при условии соблюдения стационарности оптической системы.

Анализ современных тенденций выявил вектор на создание бюджетных и компактных измерителей, способных интегрироваться в интеллектуальные транспортные сети. Выявленные ограничения промышленных трансмиссометров, такие как высокая стоимость и сложность монтажа, подтверждают актуальность разработки упрощенного макета оптического датчика. Таким образом, результаты теоретического анализа служат фундаментом для последующего проектирования и реализации аппаратной части макета, а также разработки алгоритмов программной фильтрации и компенсации внешних помех, что будет рассмотрено в следующей главе.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ МАКЕТА ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА МДВ

Процесс разработки макета включал в себя несколько итераций: от выбора стабильных электронных компонентов до отработки методики измерений, исключающей влияние аппаратных погрешностей и внешних факторов. В данной главе описывается эволюция конструкции прибора, программная реализация и обоснование выбранной методики эксперимента.

2.1. Выбор и сравнительный анализ основных электронных компонентов

Проектирование макета оптического датчика МДВ (трансмиссометра) началось с подбора электронной базы, способной обеспечить высокую точность измерений при минимальных габаритах и стоимости конструкции. Основными требованиями к компонентам стали: стабильность работы цифрового интерфейса, низкий уровень собственных шумов сенсора и возможность оперативной отладки алгоритмов. В данном разделе рассматривается обоснование выбора управляющей платформы и сравнительный анализ фотометрических модулей, проведенный в ходе предварительных испытаний

2.1.1. Выбор управляющей микроконтроллерной платформы

Для управления макетом и обработки данных была выбрана платформа Arduino Nano –рис. 2.1. Это решение является оптимальным, так как оно сочетает в себе низкую стоимость (около 500 рублей), миниатюрность, простоту настройки и достаточную для метеорологических измерений точность.

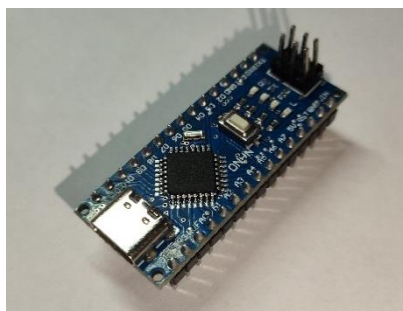


Рисунок 2.1 – Плата Arduino Nano

Одно из главных преимуществ Arduino Nano – её малые размеры (всего 18 x 45 мм). В отличие от полноразмерных плат, Nano легко помещается внутри небольшого корпуса. Это позволило:

- сделать прибор переносным и аккуратным;
- максимально сократить длину проводов до датчика, что защищает цифровой сигнал от помех и наводок.

Работа с макетом ведется в среде Arduino IDE. Она подходит для учебных и исследовательских задач по нескольким причинам:

1. Понятный язык. Программирование на упрощенном C++ позволяет быстро вносить правки в алгоритм измерений.
2. Готовые библиотеки. Для датчика BH1750FVI существуют готовые программные модули (библиотека Wire.h), что упрощает опрос сенсора до нескольких строчек кода.
3. Быстрое получение данных. Через монитор порта можно сразу получать данные изменения видимости и строить по ним графики прямо на экране ноутбука.

Несмотря на свою простоту, Arduino Nano обеспечивает высокую надежность работы макета [21]:

1. Цифровая точность. Контроллер общается с датчиком по цифровому протоколу I2C. В отличие от аналоговых датчиков, здесь данные передаются в виде чисел, поэтому значения освещенности не искажаются из-за сопротивления проводов или падения напряжения.

2. Стабильное питание. Плата имеет два выхода напряжения 5 В и более стабильный 3.3 В.
3. Защищенность. Микроконтроллер ATmega328P проверен годами эксплуатации в различных устройствах и устойчив к длительной непрерывной работе.

Выбор подтверждается и характеристиками платы, которые полностью перекрывают потребности нашего прибора:

- напряжение питания: 5 В, возможна по USB от ноутбука, что позволяет одновременно запитывать плату и снимать данные;
- память: достаточна для хранения алгоритмов усреднения данных (чтобы убрать «прыжки» показаний) и калибровочных коэффициентов.

Таким образом, Arduino Nano превращает сложный процесс измерения прозрачности атмосферы в простую и надежную процедуру, доступную для реализации в рамках данного исследования.

2.1.2. Сравнительный анализ цифровых датчиков освещенности

На начальном этапе проектирования в качестве основного детектора был выбран цифровой датчик освещенности BH1750 – рис. 2.2. По заверению производителя имеет следующие характеристики:

- широкий диапазон измерений: 1 – 65535 люкс;
- спектральная чувствительность максимально приближена к фотометрической функции человеческого глаза, что критически важно для определения метеорологической видимости;
- интерфейс I2C, позволяющий передавать данные в цифровом виде.

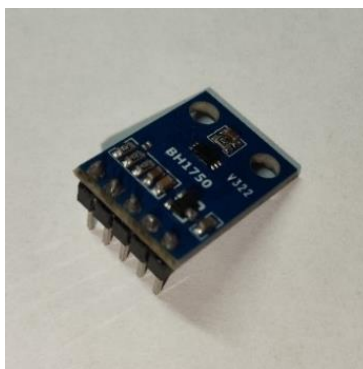


Рисунок 2.2 – Датчик BH1750

Однако в процессе предварительных испытаний при подключении Arduino к ноутбуку, находящемуся в режиме зарядки, произошел выход датчика из строя. Вероятной причиной отказа стал скачок напряжения в цепи питания или наводка со стороны блока питания ноутбука. Это позволило сделать важный вывод: стандартные модули BH1750 крайне чувствительны к качеству питания и электромагнитным помехам.

Для создания более надежного макета был выбран модуль BH1750FVI – рис. 2.3а. Несмотря на схожую архитектуру, данный модуль обладает рядом преимуществ [22]:

- напряжение питания – модуль работает от 3.3 В (вместо 5 В), что позволяет использовать более стабильные линии питания микроконтроллера Arduino;
- защитное исполнение – наличие в комплекте полусферического белого светорассеивающего колпачка.

2.1.3. Исследование влияния конструктивных элементов сенсора на чувствительность

Мною был проведён эксперимент с защитным колпачком, для того чтобы увеличить поступающий свет на чувствительный элемент и ускорить инерцию прибора. В ходе тестов сравнивалась работа датчика с открытым фотодиодом и с надетым колпачком.

Без колпачка: при непрерывном опросе (каждые 2 секунды) значения освещенности были немного не стабильными – рис. 2.3б.



```
Zamer 1: 9964.17 lux
Zamer 2: 9971.67 lux
Zamer 3: 9968.33 lux
Zamer 4: 9965.00 lux
Zamer 5: 9968.33 lux
Zamer 6: 9970.00 lux
Zamer 7: 9964.17 lux
Zamer 8: 9978.33 lux
Zamer 9: 9966.67 lux
Zamer 10: 9970.00 lux
```

а) Датчик BH1750FVI без защитного колпачка б) Значения освещённости датчика BH1750FVI без защитного колпачка

Рисунок 2.3 – Значения освещённости датчика BH1750FVI без защитного колпачка

С колпачком – рис. 2.4: показания были такими же по стабильности, но более тусклыми – рис. 2.5:

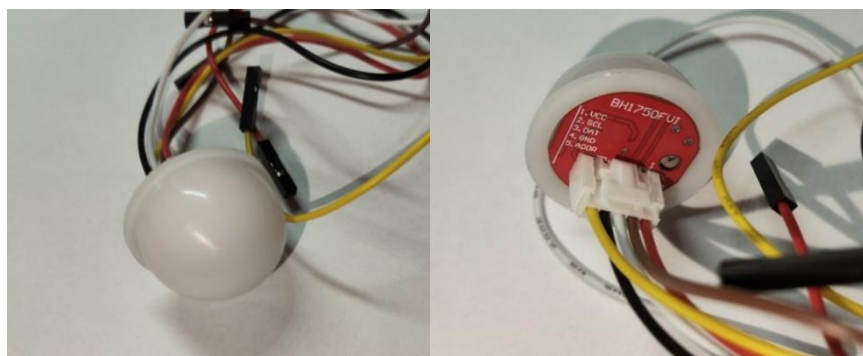


Рисунок 2.4 – Датчик BH1750FVI с защитным колпачком и подключёнными проводами

```
Zamer 1: 5877.50 lux
Zamer 2: 5880.83 lux
Zamer 3: 5876.67 lux
Zamer 4: 5875.83 lux
Zamer 5: 5878.33 lux
Zamer 6: 5877.50 lux
Zamer 7: 5880.83 lux
Zamer 8: 5879.17 lux
Zamer 9: 5877.50 lux
Zamer 10: 5881.67 lux
```

Рисунок 2.5 – Значения освещённости с защитным колпачком

Следовательно, для дальнейшей эксплуатации было решено использовать датчик без защитного колпачка. Стоит учитывать, что макет прибора будет работать исключительно в помещении и попадание на него влаги и чего-либо способного вывести его из строя не допускается. Когда прибор не используется, следует надевать колпачок для предотвращения оседания пыли на фотодиод.

2.2. Разработка оптической системы и подбор излучателя

Для доказательства возможности сборки надёжного и точного трансмиссометра на основе вышеперечисленных компонентов необходимо создать лабораторный макет прибора и его исследовать. В данной работе было отработано 2 схемы макета, основная идея конструкции заключалась в размещении в небольшом корпусе, стоящем на ровной рабочей поверхности, микроконтроллера Arduino Nano и подключение к нему датчика освещённости вынесенного за пределы корпуса.

2.2.1. Исследование открытой оптической схемы и её ограничений

Первая схема макета – рис. 2.6, 2.7а: на ровной поверхности с расстоянием 0,5 - 1 м находится источник света и датчик с надетой на него чёрной и матовой внутри трубкой (для того, чтобы сторонний свет и блики максимально ей поглощались). Данная конструкция хорошо визуально демонстрирует работу прибора, однако в ходе опытов она показала, что не может обеспечить достаточную яркость падающего на датчик света.

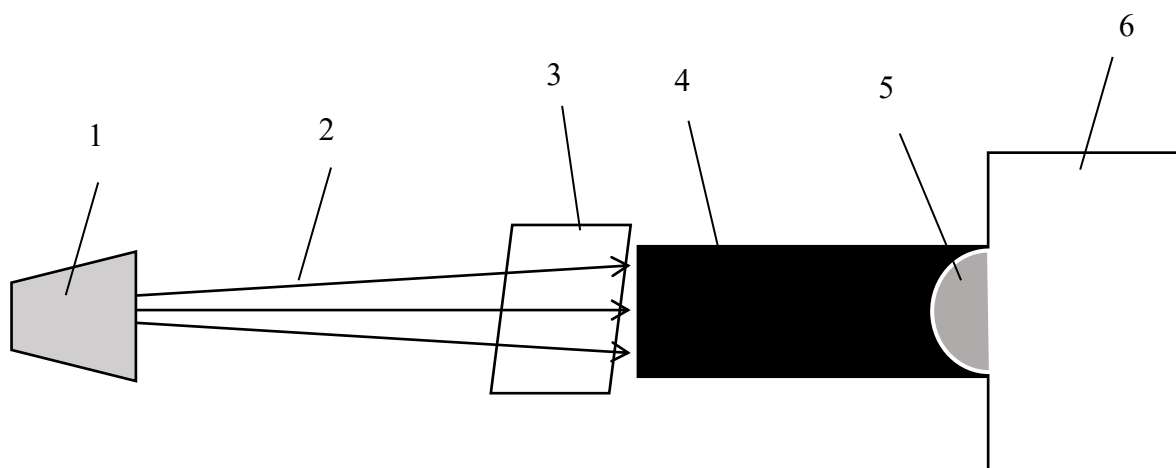


Рисунок 2.6 – Первая схема макета

- 1 – Источник света
- 2 – Излучаемый свет
- 3 – Светофильтр
- 4 – Чёрная трубка
- 5 – Датчик освещённости BH1750FVI
- 6 – Корпус с микроконтроллером



а) Макет прибора первой схемы

```

Zamer 1: 988.33 lux
Zamer 2: 988.33 lux
Zamer 3: 988.33 lux
Zamer 4: 988.33 lux
Zamer 5: 988.33 lux
Zamer 6: 988.33 lux
Zamer 7: 988.33 lux
Zamer 8: 988.33 lux
Zamer 9: 987.50 lux
Zamer 10: 987.50 lux
  
```

б) Измерения освещённости, сделанные макетом прибора первой схемы

Рисунок 2.7 – Реализация макета первой схемы

Хорошая стабильность, но слишком низкая яркость – рис. 2.7б

2.2.2. Проектирование закрытой схемы с концентратором света

Вторая схема макета – рис. 2.8: на датчик была надета трубка (испытано две трубки одна средняя длиной 20 см – рис. 2.9а, вторая короткая длиной 9 см – рис. 2.9б; так как более короткая трубка обеспечивает значительно большую яркость (освещенность) на поверхности датчика, то конечный вариант был с короткой трубкой), внутренняя поверхность которой выполнена белой для обеспечения многократных переотражений и концентрации всего доступного света на датчике. Трубка прислоняется непосредственно к источнику света (для снижения стороннего света). Такая конструкция на мой взгляд обеспечивает большую точность проведения экспериментов, так как устраняет погрешности, связанные с рассогласованием (деюстировкой) оптических осей, которые в открытых системах могут возникать из-за вибраций или деформации основания; повышает энергетическую эффективность, свет, отраженный от стенок, суммируется с прямым излучением, увеличивая общую освещенность на детекторе, а так же закрытый канал обеспечивает полную изоляцию приемника от неконтролируемых источников света (инсоляция, искусственное освещение помещения).

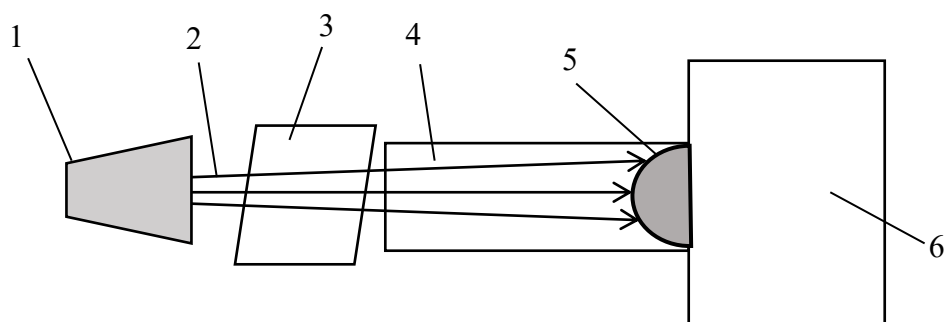


Рисунок 2.8 – Вторая схема макета

- 1 – Источник света
- 2 – Излучаемый свет
- 3 – Светофильтр
- 4 – Белая трубка

5 – Датчик освещённости BH1750FVI

6 – Корпус с микроконтроллером



а) С длинной трубкой



б) С короткой трубкой

Рисунок 2.9 – Макет прибора второй схемы

Данные измерений, сделанных макетом второй схемы представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Параметры измерений опытного образца (вторая схема)

№ измерения	Освещённость, люкс	
	С длинной трубкой	С короткой трубкой
1	1838	9101
2	1837	9113
3	1837	9117
4	1838	9105
5	1835	9111

Освещённость, зафиксированная прибором с короткой трубкой, превысила показатели длинной трубки в пять раз. Значения стабильности выходного сигнала составили 0,2 % для обоих случаев, что в абсолютном выражении соответствует ± 2 лк для длинной и ± 8 лк для короткой трубки.

2.2.3. Сравнительный анализ стабильности и выбор источника излучения

Для работы макета трансмиссометра и испытаний датчика освещённости критически важна стабильность светового потока. При первых опытах наблюдался дрейф показаний, что сначала было принято, как неисправность датчика, поэтому в затемнённом помещении (для того, чтобы максимально исключить сторонний свет), при постоянной прозрачности атмосферы были проведены испытания четырёх типов источников: настольной LED-лампы, светодиодного фонаря (аккумуляторного), лампы накаливания, светодиодного фонаря (телефонного).

1. Настольная LED-лампа. Использовалась на начальных этапах работы с прибором. Обладает низкой концентрацией пучка.

Результаты испытаний светодиодной лампы, проведенных для оценки стабильности источника излучения, представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Замеры светодиодной лампы

№ измерения	Освещённость, люкс	
	Средний режим яркости	Высокий режим яркости
1	4490	9971
2	4485	9954
3	4478	9943
4	4480	9934
5	4479	9920
6	4476	9914
7	4473	9904
8	4474	9899
9	4475	9898
10	4475	9883

Из теста видно, что при режиме средней яркости, свет достаточно стабильный, при высокой яркости наблюдается увеличение разброса показаний; дальнейший анализ будет представлен в сравнение всех источников света.

2. Светодиодный фонарь (аккумуляторный). Изначально, предполагалось именно его использовать в финальной конструкции. Было испытано две схемы питания фонаря: первый предполагал использование аккумуляторной батареи, второй – подключение к розетке через понижающий блок питания, обеспечивающий стабильный ток.

Результаты измерений освещённости светодиодного фонаря при различных схемах питания представлены в таблице 2.3

Таблица 2.3 – Тест с фонариком

№ измерения	Освещённость, люкс	
	Питание от АКБ	Питание от розетки
1	17636	17018
2	16518	18503
3	16256	18429
4	14846	16877
5	14706	15948
6	14308	15510
7	14156	18102
8	14135	15976
9	13694	15571
10	13338	15036

Из опыта стало понятно, что при питании от АКБ яркость падает по мере разряда. При переделке на питание от розетки возникла проблема температурного дрейфа: диод сильно нагревался, и его световой поток

колебался и "проседал" в процессе работы, что недопустимо для метрологической оценки [20].

3. Лампа накаливания. Имеет достаточно тёплый свет, а также по умолчанию поддерживает питание от сети.

Данные измерений освещённости лампы накаливания представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Тест с лампой накаливания

№ измерения	Освещённость, люкс
1	4788
2	4835
3	4929
4	4931
5	4887
6	4953
7	4971
8	4819
9	5005
10	5006

Из данных измерений в таблице видно, что значения измерений освещённости имеют дрейф, поэтому лампа отвергнута из-за, тепловыделения способного навредить датчику или исказить его показания, а также сильной зависимости светового потока от микроколебаний напряжения в сети [25].

4. Светодиодный фонарь (телефонный). Обладает низкой концентрацией светового пучка, по умолчанию запитан от аккумулятора.

Результаты контрольных замеров освещенности при использовании фонарика мобильного телефона в качестве источника света представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Тест с фонариком на телефоне

№ измерения	Освещённость, люкс
1	9081
2	9083
3	9087
4	9079
5	9078
6	9082
7	9086
8	9091
9	9088
10	9089

Как было выяснено из измерений, фонарик обладает отличной стабильностью и наименьшим дрейфом среди прочих источников света.

Далее по результатам всех измерений был построен график – рис. 2.10.

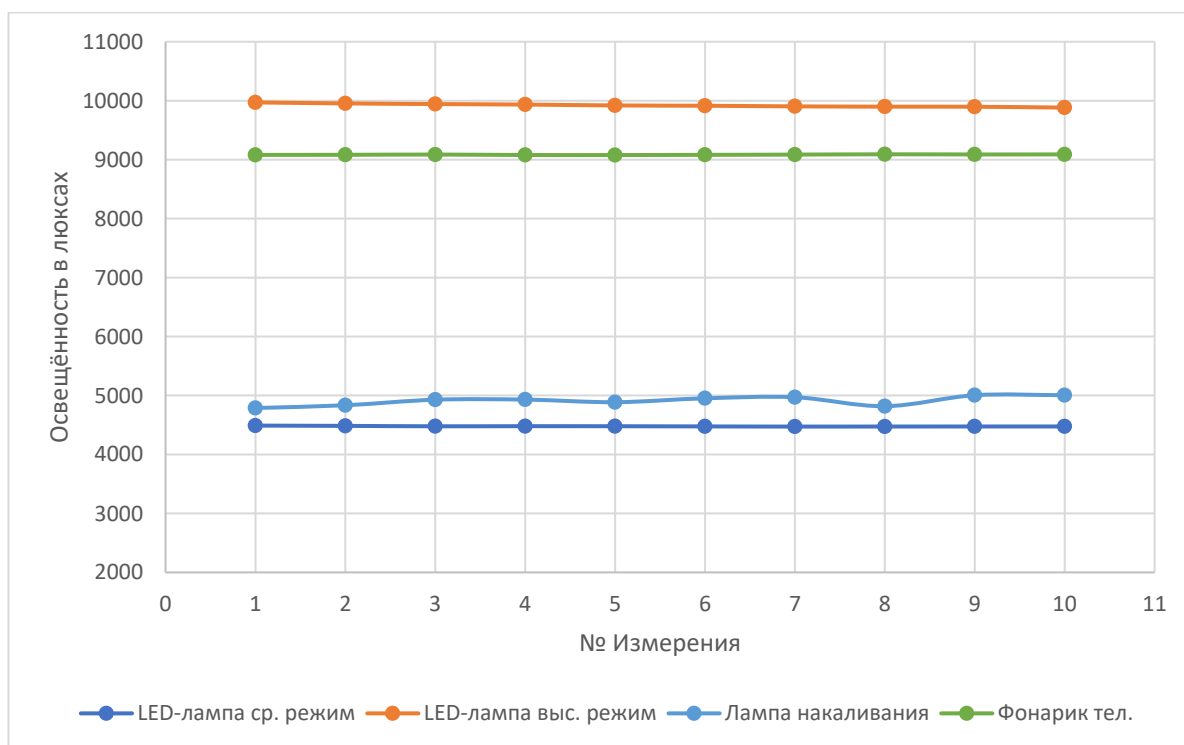


Рисунок 2.10 – График стабильности освещённости от различных источников

На рисунке 2.10 представлены результаты измерения стабильности светового потока для трех типов источников. Для LED-лампы в режиме средней яркости (табл. 2.2) разброс значений не превышает ± 8 лк, что составляет относительную погрешность около 0,2%. В режиме высокой яркости (табл. 2.2) разброс возрастает до ± 44 лк (погрешность $\sim 0,4\%$), что связано с нагревом кристалла и нестабильностью блока питания. Лампа накаливания (табл. 2.4) демонстрирует выраженный дрейф – рост освещенности с 4788 до 5006 лк за 20 секунд, что объясняется разогревом спирали [25]. Фонарик телефона (табл. 2.5) показал наилучшую стабильность: колебания в пределах ± 6 лк при средней освещенности 9084 лк, что делает его предпочтительным источником для лабораторного макета.

Вывод по разделу 2.2

В итоге я пришёл к выводу, что лучшим решением будет использовать достаточно стабильный при наибольшей яркости фонарик телефона в сочетании со второй схемой макета, на мой взгляд, это обеспечит хорошие демонстративные возможности прибора.

Изменение прозрачности среды в разработанных схемах предполагается обеспечивать за счет применения имитаторов ослабления атмосферы. Для этого между трубкой и источником света размещаются прозрачные бесцветные светофильтры с различной оптической плотностью, изготовленные из нескольких слоев полимерной пленки. Такой подход позволяет дискретно изменять коэффициент пропускания системы, имитируя различные метеорологические условия – от легкой дымки до плотного тумана – оставаясь в рамках лабораторного эксперимента.

Мною предполагается, что реальное расстояние между источником света и датчиком в коде прибора задается как переменная величина. Это позволяет, не меняя конструкцию макета, имитировать измерения видимости на различных дистанциях. Поскольку закон Бугера-Ламберта-Бера связывает

прозрачность среды с длиной оптического пути, расчет метеорологической дальности видимости (МДВ) может быть математически масштабирован.

Таким образом, макет становится универсальным инструментом, способным моделировать работу трансмиссометра с базой как в несколько метров, так и в десятки метров, путем простой корректировки коэффициентов в программном обеспечении.

2.3. Методика минимизации фоновой засветки и калибровки прибора

Для обеспечения достоверности получаемых данных макет оптического датчика требует предварительной калибровки и верификации в условиях, максимально приближенных к реальным физическим процессам ослабления света. Процесс калибровки включает в себя не только программную фиксацию фоновых значений, но и серию лабораторных испытаний с использованием эталонных оптических элементов. Это позволяет определить реальную чувствительность системы к изменению прозрачности среды и математически обосновать вносимые программные поправки

2.3.1. Аппаратно-программные способы устранения влияния внешней освещенности

В многочисленных опытах было выяснено, что в трубке обычно присутствует сторонний свет в обеих схемах макета, поэтому был сделан вывод – следует учитывать паразитную засветку. Как было написано ранее, для повышения точности измерений можно использовать затемнённое помещение, однако это не очень практично, поэтому была разработана методика коррекции на сторонний свет.

Теория этой методики основана на законе аддитивности освещенностей [6]. Согласно этому закону, освещенность некоторой поверхности, создаваемая несколькими источниками света, равна алгебраической сумме освещенностей,

создаваемых каждым источником в отдельности. Используя принцип суперпозиции, можно вывести формулу:

$$E_{\text{общ}} = E_{\text{пол}} + E_{\text{фон}} \quad (2.1)$$

где:

$E_{\text{общ}}$ – освещённость, измеренная датчиком;

$E_{\text{фон}}$ – измеренная освещённость без источника света (освещённость фоновой засветки);

$E_{\text{пол}}$ – полезный сигнал, который требуется найти.

Итак, исходя из данной формуле мной был определен следующий алгоритм действий:

1. Сначала измеряется освещённость без источника света при идеальной прозрачности – это значение $E_{\text{фон0}}$ для источника света.
2. Затем измеряется общая освещённость с включенным источником также при идеальной прозрачности – $E_{\text{общ0}}$ – рис. 2.11а.
3. Полезный сигнал исходя из формулы будет: $E_{\text{пол0}} = E_{\text{общ0}} - E_{\text{фон0}}$ – рис. 2.11б; данное значение рассчитано для конкретного источника света и далее принимается константой.

Далее пункты 1-3 повторяются со вставленными светофильтрами, полученное значение будет показывать прозрачность.

```
Фоновая освещённость установлена: 0.00
Сколько замеров освещённости сделать?
Zamer 1: 8635.83 lux
Zamer 2: 8635.00 lux
Zamer 3: 8634.17 lux
Zamer 4: 8638.33 lux
Zamer 5: 8631.67 lux
Zamer 6: 8634.17 lux
Zamer 7: 8633.33 lux
Zamer 8: 8639.17 lux
Zamer 9: 8645.83 lux
Zamer 10: 8638.33 lux
```

а) Без вычитания фоновой
засветки

```
Фоновая освещённость установлена: 29.00
Сколько замеров освещённости сделать?
Zamer 1: 8611.00 lux
Zamer 2: 8607.67 lux
Zamer 3: 8609.33 lux
Zamer 4: 8603.50 lux
Zamer 5: 8611.00 lux
Zamer 6: 8616.83 lux
Zamer 7: 8609.33 lux
Zamer 8: 8611.00 lux
Zamer 9: 8609.33 lux
Zamer 10: 8610.17 lux
```

б) С вычитанием фоновой
засветки

Рисунок 2.11 – Измерения освещённости

Стоит отметить, что обычно паразитарная засветка не превышает 50 люкс, поэтому сильных изменений в результатах не наблюдается, однако это всё равно является погрешностью, которую стоит устранить.

Также минусом данной методики является предположение, что сторонний свет является постоянной величиной в измеряемом временном промежутке, что не всегда так (блики/вспышки).

2.3.2. Верификация показаний по эталонным светофильтрам

На первом этапе использовались два поверенных светофильтра от промышленного трансмиссометра с номинальными значениями пропускания $T = 70 \%$ и $T = 10 \%$. Тестирование проводилось в трех конфигурациях: без защитной трубки, с короткой белой трубкой и с черной матовой трубкой. Во всех случаях результаты были идентичны: $80 \% \pm 1 \%$ для первого фильтра – рис. 2.12а и $12 \pm 1 \%$ для второго – рис. 2.12б.

```
Performing 5 illuminance measurements:
Measurement 1: 3683.33 lx
Measurement 2: 3680.00 lx
Measurement 3: 3684.17 lx
Measurement 4: 3677.50 lx
Measurement 5: 3677.50 lx
Performing 5 illuminance measurements:
Measurement 1: 2935.00 lx
Measurement 2: 2935.00 lx
Measurement 3: 2930.00 lx
Measurement 4: 2936.67 lx
Measurement 5: 2936.67 lx
Performing 5 illuminance measurements:
Measurement 1: 3678.50 lx
Measurement 2: 3679.17 lx
Measurement 3: 3679.17 lx
Measurement 4: 3677.50 lx
Measurement 5: 3680.00 lx
```

```
Performing 5 illuminance measurements:
Measurement 1: 3949.17 lx
Measurement 2: 3945.00 lx
Measurement 3: 3950.00 lx
Measurement 4: 3946.67 lx
Measurement 5: 3946.67 lx
Performing 5 illuminance measurements:
Measurement 1: 510.83 lx
Measurement 2: 510.83 lx
Measurement 3: 510.83 lx
Measurement 4: 510.83 lx
Measurement 5: 511.67 lx
Performing 5 illuminance measurements:
Measurement 1: 3946.67 lx
Measurement 2: 3946.67 lx
Measurement 3: 3945.83 lx
Measurement 4: 3945.00 lx
Measurement 5: 3944.17 lx
```

а) Коэффициент пропускания – 80 % б) Коэффициент пропускания – 12 %

Рисунок 2.12 – Измерения коэффициента пропускания каждого стёклышка

Тот факт, что при совмещении двух фильтров прибор показал значение 10 % – рис 2.13, которое практически совпадает с расчетным произведением измеренных величин ($0,80 \cdot 0,12 \sim 0,10$), подтверждает высокую внутреннюю

стабильность макета. Зафиксированное систематическое завышение коэффициента пропускания (0,80 вместо эталонных 0,70) обусловлено явлением спектрального несовпадения характеристик используемого излучателя, светофильтра и фотоприемника. Поверенные эталонные стекла, как правило, калибруются с использованием стандартного источника типа «А» (лампа накаливания с цветовой температурой 2856 К), обладающего непрерывным спектром с высокой долей энергии в красно-оранжевой и ближней ИК-области. В то же время в разрабатываемом макете применен белый светодиод (LED) с характерным узким пиком в синей области и провалом в части видимого спектра. Поскольку датчик BH1750FVI имеет кривую спектральной чувствительности, имитирующую человеческий глаз (максимум на 555 нм), различие в спектральном составе используемого светодиода относительно эталонной лампы накаливания приводит к закономерному смещению регистрируемых значений. Данное отклонение носит характер устойчивой систематической погрешности, которая может быть устранена путем введения калибровочного коэффициента

Методика проведения эксперимента. Испытания проводились в закрытом оптическом тракте. Для исключения случайных погрешностей, вызванных деюстировкой (нарушением соосности излучателя и приемника), применялась следующая процедура:

1. Измерение фоновой освещенности в «чистом» створе ($I_{\text{чис1}}$).
2. Установка светофильтра внутри трубки и фиксация значения (I).
3. Извлечение фильтра и повторное измерение освещенности ($I_{\text{чис2}}$).
4. Расчет коэффициента пропускания проводился только при условии

$I_{\text{чис1}} \sim I_{\text{чис2}}$, что гарантировало стабильность положения оптических элементов в процессе опыта – рис. 2.13

```
Performing 5 illuminance measurements:
Measurement 1: 3949.17 lx
Measurement 2: 3945.00 lx
Measurement 3: 3950.00 lx
Measurement 4: 3946.67 lx
Measurement 5: 3946.67 lx
Performing 5 illuminance measurements:
Measurement 1: 510.83 lx
Measurement 2: 510.83 lx
Measurement 3: 510.83 lx
Measurement 4: 510.83 lx
Measurement 5: 511.67 lx
Performing 5 illuminance measurements:
Measurement 1: 3946.67 lx
Measurement 2: 3946.67 lx
Measurement 3: 3945.83 lx
Measurement 4: 3945.00 lx
Measurement 5: 3944.17 lx
```

Рисунок 2.13 – Измерения коэффициента пропускания двух стёклышек

2.3.3. Исследование линейности на каскадных наборах светофильтров

Целью данного этапа испытаний являлось подтверждение линейности динамической характеристики фотоприемника ВН1750FVI при существенном ослаблении светового потока. Проверка линейности критически важна для трансмиссометра, так как расчет МДВ базируется на экспоненциальном законе Бугера-Ламберта-Бера, и любая нелинейность датчика приведет к прогрессирующей ошибке при моделировании сильного тумана.

Методика эксперимента заключалась в последовательном увеличении оптической плотности среды путем «накручивания» одинаковых светофильтров один за другим (каскадом) – рис. 2.14. Для каждой итерации фиксировалось значение освещенности, которое затем сравнивалось с теоретически рассчитанным значением, исходя из коэффициента пропускания одиночного фильтра.



а) Сеты светофильтров

б) Фиксация светофильтров

Рисунок 2.14 – Процесс измерения коэффициента пропускания

Результаты измерений для различных наборов (сетов) фильтров сведены в таблицу 2.6.

Таблица 2.6. Результаты каскадных измерений пропускания

Кол-во слоев	Сет №1 (Прозрачные)	Сет №2 (Средние)	Сет №3 (Плотные)
0 (Чистый створ)	1,00	1,00	1,00
1 слой	0,78	0,23	0,12
2 слоя	0,68	0,06	0,01
3 слоя	0,55	0,01	—
4 слоя	0,50	—	—
5 слоев	0,45	—	—
6 слоев	0,38	—	—

Анализ данных таблицы 2.6 выявил специфическую аномалию в Сете №1. При использовании шести прозрачных стекол суммарное пропускание составило 0,38, что значительно выше теоретического значения 0,23

($0,78^6 \sim 0,23$). Визуальный контроль подтвердил, что прозрачность стопки субъективно ближе к 0,38.

Данное явление не является признаком нелинейности самого датчика, а объясняется физикой многократных переотражений света внутри прозрачного каскада. В отличие от плотных фильтров, где переотраженный от граней свет быстро поглощается материалом, в прозрачной стопке лучи многократно отражаются между поверхностями стекол и микродефектами (потертостями), в конечном итоге достигая чувствительной зоны фотоприемника. Это создает «эффект накопленной освещенности», искажающий чистую экспоненту ослабления.

Испытания со средними и плотными фильтрами (Сеты №2 и №3), где переотражения нивелируются поглощением, подтвердили адекватность работы датчика и сохранение его линейности в широком диапазоне:

- Средние светофильтры – $0,23 * 0,23 \sim 0,06$ и $0,06 * 0,23 \sim 0,01$
- Плотные светофильтры – $0,12 * 0,12 \sim 0,01$

Аномалия, обнаруженная в прозрачном каскаде, признана конструктивной особенностью закрытого оптического канала и была учтена при разработке финальной методики калибровки. Таким образом, прибор пригоден для достоверного измерения МДВ при условии исключения влияния переотражений в программно-математической модели.

2.3.4. Обоснование и расчет поправочного коэффициента

На основе проведенных циклов верификации было установлено, что макет демонстрирует стабильную повторяемость результатов, однако при этом наблюдается систематическое завышение регистрируемых коэффициентов пропускания. Данное отклонение, как было обосновано ранее, вызвано спектральным несовпадением излучателя и эталонов. Для приведения показаний макета к реальным метеорологическим стандартам необходимо введение корректирующей математической модели.

Поскольку зависимость между измеренными ($T_{\text{изм}}$) и истинными ($T_{\text{ист}}$) значениями пропускания в рабочем диапазоне носит близкий к линейному характер, расчет поправочного коэффициента проводился методом построения аппроксимирующей прямой по трем опорным точкам, полученным в ходе экспериментов:

1. Точка «высокой прозрачности»: $T_{\text{изм}} = 0,80$ при эталонном $T_{\text{ист}} = 0,70$.
2. Точка «средней плотности»: $T_{\text{изм}} = 0,12$ при эталонном $T_{\text{ист}} = 0,10$.
3. Точка «высокой плотности» (каскад): $T_{\text{изм}} = 0,10$ при эталонном $T_{\text{ист}} = 0,07$.

Для нахождения параметров корректирующей функции вида $T_{\text{ист}} = k \cdot T_{\text{изм}} + b$ была решена система уравнений по методу наименьших квадратов. Выбор трех точек вместо двух позволил минимизировать ошибку как в зоне «слабого тумана», так и в зоне критического ухудшения видимости.

В результате расчетов были получены следующие значения:

- Угловой коэффициент (чувствительность): $k \sim 0,90$.
- Свободный член (смещение нуля): $b \sim -0,01$.

Таким образом, финальная калибровочная формула, интегрированная в алгоритм обработки данных, принимает вид:

$$T_{\text{ист}} = 0,90 \cdot T_{\text{изм}} - 0,01 \quad (2.2)$$

Введение данной поправки позволяет программно компенсировать спектральную избыточность белого светодиода и привести работу макета в соответствие с характеристиками стандартных аэродромных трансмиссометров. Использование относительных коэффициентов пропускания вместо абсолютных величин освещенности гарантирует устойчивость методики к естественной деградации (тускнению) источника света или незначительным колебаниям напряжения питания.

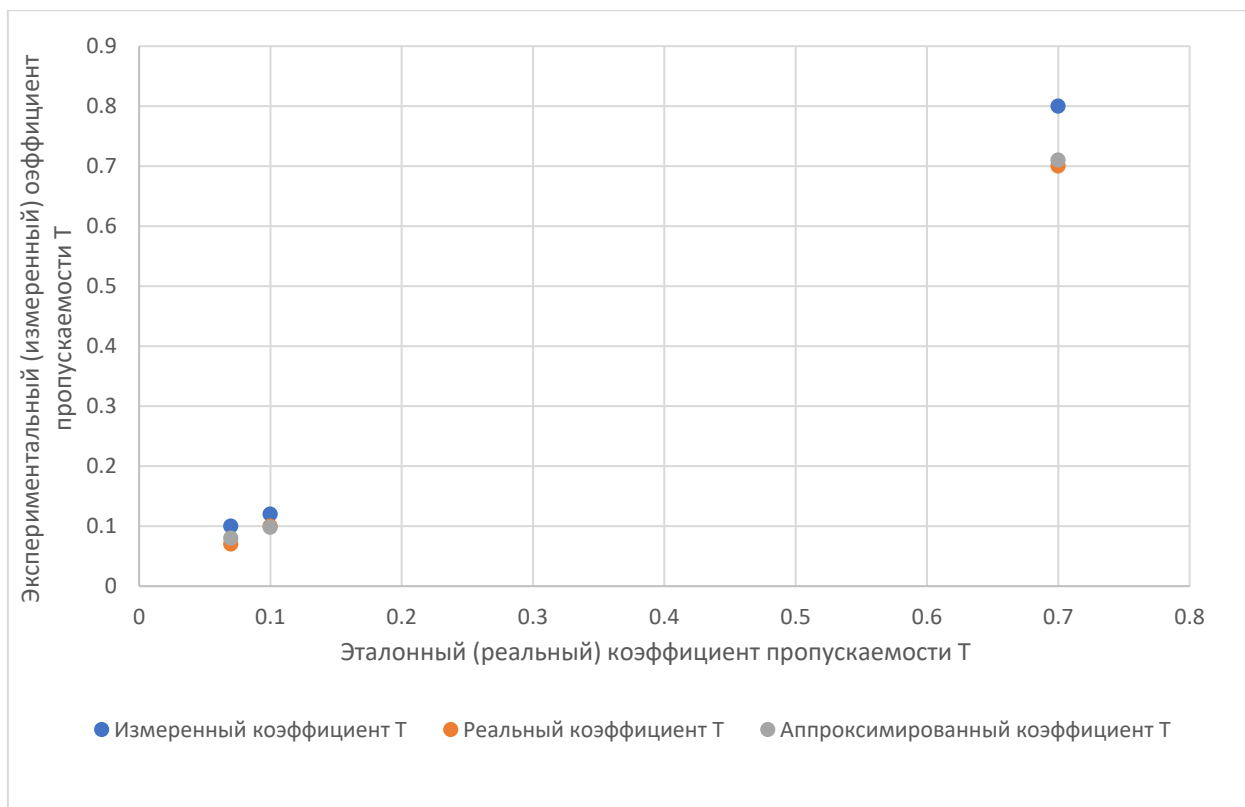


Рисунок 2.15 – График сравнения коэффициентов пропускания T

На рисунке 2.15 представлен сравнительный анализ экспериментально полученных значений коэффициента пропускания до и после применения калибровочных поправок в сопоставлении с их эталонными (реальными) характеристиками. Как видно из графика, исходные данные характеризуются устойчивым систематическим завышением, обусловленным спектральным несовпадением параметров светодиодного излучателя и кривой чувствительности датчика ВН1750FVI. Внедрение разработанной калибровочной формулы позволило эффективно компенсировать данную погрешность, обеспечив высокую сходимость скорректированных результатов с номинальными значениями эталонных фильтров. Минимальное отклонение аппроксимированной кривой от реального коэффициента пропускания во всем исследуемом диапазоне подтверждает адекватность предложенной математической модели и линейность динамической характеристики фотоприемника при различных степенях ослабления светового потока.

2.4 Программная реализация и управление измерениями

Программное обеспечение для макета было разработано с целью автоматизации процесса сбора фотометрических данных и их последующего пересчета в метеорологическую дальность видимости (МДВ). В ходе итерационной разработки алгоритм прошел путь от простых прямых измерений до сложной системы с калибровочными поправками и защитой от аппаратного дрейфа.

Первая версия кода сразу выдавала расчетную дальность видимости, на основании измеренной освещенности, и введенных параметров, таких как расстояние между источником света и датчиком и освещенность при идеальных условиях. Однако из-за высокой чувствительности формул к малейшим колебаниям света, значения МДВ "скакали", что затрудняло анализ. Было решено изменить подход и снимать "сырые" данные об освещенности в люксах, их проще исследовать, наблюдать изменения и динамику, поэтому был сделан ещё несколько версий кода, в котором регулируется количество измерений и вычитание фоновой освещенности.

После того как прибор был полностью исследован, выбран источник света и введена методика корректировки на паразитарную засветку, первая версия кода была дополнена.

2.4.1. Анализ исследовательского алгоритма для отладки компонентов

На начальном этапе, когда велась работа по выбору источника света, анализу фоновой засветки и проверке герметичности оптического тубуса, использовался специальный диагностический код (Приложение А). В отличие от финальной версии, эта программа была сфокусирована исключительно на мониторинге освещенности и проверке стабильности системы в различных условиях.

```

Serial.println("Введите фоновую освещённость:");
while (Serial.available() == 0) {}
background = Serial.parseFloat();
// Очистка буфера
while (Serial.available() > 0) Serial.read();
Serial.print("Фоновая освещённость установлена: ");
Serial.println(background);
} else if (cmd == 'c') {
background = 0.0;
Serial.println("Фоновая освещённость сброшена.");
}
}

```

Рисунок 2.16 – Фрагмент кода для настройки фоновой коррекции

Как видно на Рисунке 2.16, в данном коде реализована возможность оперативного задания фоновой освещенности ($E_{\text{фон}}$). Это было критически важно на этапе тестов в различных помещениях: исследователь мог замерить «темновой ток» датчика при выключенном фонаре и сразу внести его в программу. Такой подход позволял мгновенно видеть «чистый» полезный сигнал, что ускоряло процесс юстировки линз и светодиода.

```

if (cmd == 'l') {
Serial.println("Сколько замеров освещённости сделать?");
while (Serial.available() == 0) {}
int numMeasurements = Serial.parseInt();
// Очистка буфера от оставшихся символов (например, \n)
while (Serial.available() > 0) Serial.read();

for (int i = 0; i < numMeasurements; i++) {
float lux = lightMeter.readLightLevel() - background;
Serial.print("Zamer ");
Serial.print(i + 1);
Serial.print(": ");
Serial.print(lux);
Serial.println(" lux ");
delay(2000); // Задержка 2 секунды между замерами для стабильности
}
}

```

Рисунок 2.17 – Реализация цикла многократных измерений

Одной из ключевых особенностей исследовательского кода стала возможность регулировки количества измерений в одной серии. На Рисунке 2.17 показан цикл, который выполняет заданное число замеров с определенной задержкой. Регулировка количества проб была необходима для решения нескольких задач:

1. Анализ прогрева излучателя: при включении светодиода его яркость стабилизируется не сразу. Серия из 10-20 замеров позволяла увидеть график «выхода на рабочий режим».
2. Статистическая обработка: многократные замеры помогли оценить амплитуду случайных шумов датчика и внешних помех.
3. Поиск «бликов»: при перемещении фонарика или изменении угла наклона трубки длинная серия измерений позволяла отловить кратковременные всплески освещенности, вызванные внутренними переотражениями.

Данный сервисный код послужил фундаментом для понимания физики процессов в макете, что позволило в дальнейшем перейти к написанию финального алгоритма.

2.4.2. Анализ финального алгоритма расчета МДВ

После завершения всех конструктивных доработок и вывода калибровочной формулы (раздел 2.3.4), программное обеспечение было переработано в финальный измерительный комплекс (Приложение Б). Его главная задача – перевод физической величины (люкс) в метеорологическую (метры видимости) с учетом калибровки.

```
void loop() {  
    if (Serial.available() > 0) {  
        char command = Serial.read();  
        if (command == 'o') {  
            performMeasurements();  
        } else if (command == 'm') {  
            performMDVCalculations();  
        }  
    }  
}
```

Рисунок 2.18 – Управляющая логика выбора режима работы

На Рисунке 2.18 представлена структура основного цикла. Исследователь может выбрать режим работы командой из терминала. Режим

'o' (5 измерений освещённости) остался в коде как наследство исследовательского этапа – он необходим для проверки текущего состояния прибора. Режим 'm' (5 измерений МДВ) является основным и запускает расчетный алгоритм.

```
Serial.println("Enter ideal illuminance (E_ideal) in lx:");
float E_ideal = readFloatFromSerial();

Serial.println("Enter background illuminance (E_bg) in lx:");
float E_bg = readFloatFromSerial();

Serial.println("Performing 5 MDV calculations with calibration:");
for (int i = 0; i < 5; i++) {
    float E_meas = lightMeter.readLightLevel();
    float E_corr = E_meas - E_bg; // Очистка от фона

    if (E_corr <= 0 || E_ideal <= 0) {
        Serial.println("Error: Illuminance too low or E_ideal is 0.");
        continue;
    }

    // 1. Находим измеренный коэффициент пропускания (T_meas)
    float T_meas = E_corr / E_ideal;

    // 2. Применяем калибровочную формулу (T_corr)
    float T_corr = (k_calib * T_meas) + b_calib;
```

Рисунок 2.19 – Реализация математической модели и калибровочной правки

В финальной части кода (Рисунок 2.19) реализован запрос параметров дистанции и идеальной освещенности. Здесь же интегрирована полученная нами ранее формула $T_{corr} = 0,9 * T_{meas} - 0,01$ (2.2). Программа вычисляет коэффициент пропускания, корректирует его на спектральный сдвиг и, используя натуральный логарифм, рассчитывает показатель ослабления и дальность видимости. Такой подход обеспечивает автоматизацию сложного математического аппарата прямо «на борту» микроконтроллера.

2.4.3. Организация сбора данных с помощью PuTTY

Для сбора и сохранения результатов измерений в ходе эксперимента использовался терминальный клиент PuTTY. Данное ПО выбрано из-за того, что встроенный монитор порта в среде Arduino IDE не позволял снимать много

данных за раз (возможно только копирование видимого на экране количества результатов) и вводить несколько команд на плату из монитора порта.

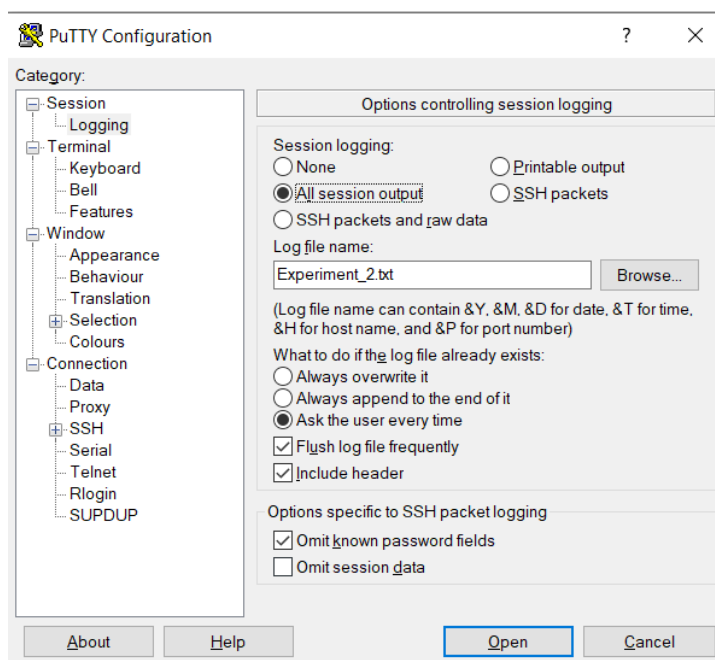


Рисунок 2.20 – Интерфейс программы PuTTY

Основным фактором выбора PuTTY стала функция Session Logging (ведение лога сессии). Эта функция позволяет автоматически записывать весь поток данных, поступающий от Arduino Nano, в текстовый файл (.txt) в режиме реального времени – рисунок 2.20. Использование данного эмулятора обеспечило ряд преимуществ при проведении серии опытов:

- Исключение человеческого фактора. Отсутствует необходимость вручную переписывать значения освещенности из окна терминала в тетрадь или таблицу. Это полностью исключает ошибки при записи цифр (например, опечатки в люксах).
- Создание первичной базы данных. Полученный текстовый файл содержит точную последовательность всех измерений с сохранением временных интервалов.
- Простота последующей обработки. Текстовый документ легко импортируется в программы для анализа данных (Microsoft Excel)

Достаточно скопировать колонку цифр, чтобы мгновенно построить графики статической характеристики или рассчитать среднее квадратичное отклонение.

- Документальность. Текстовый файл служит фактическим подтверждением проведенных испытаний, фиксируя все изменения освещенности, включая переходные процессы и паузы на «отдых» датчика.

2.4.4. Верификация расчетных алгоритмов и программной логики

Важным этапом отладки программного обеспечения стала проверка адекватности реакции алгоритма на изменение ключевых входных параметров, таких как коэффициент пропускания и величина расчетной базы. Учитывая завершение этапа основной метрологической калибровки, данная серия тестов была направлена на подтверждение внутренней логики кода и корректности математических преобразований в среде микроконтроллера при различных сценариях эксплуатации.

Для имитации различных фаз помутнения атмосферы в закрытом оптическом канале использовались каскады из полимерных пленок. Несмотря на наличие определенных оптических неоднородностей, обусловленных текстурой адгезивного слоя и возможными микродеформациями материала, данные элементы позволили сформировать устойчивый градиент ослабления светового потока. В ходе испытаний фиксировалась стабильная корреляция между физическим перекрытием канала и программным выводом данных: при последовательном увеличении числа слоев полимерного покрытия алгоритм демонстрировал закономерное и предсказуемое снижение расчетной метеорологической дальности видимости. Процесс пошаговой регистрации данных при использовании фильтров различной плотности продемонстрирован на рисунке 2.21. Это подтверждает, что программная реализация математической модели корректно интерпретирует динамику

падения освещенности, обеспечивая логическую связь между прозрачностью среды и итоговым результатом.

```
Performing 5 MDV calculations:  
Calculation 1: MDV = 442.68 meters  
Calculation 2: MDV = 428.41 meters  
Calculation 3: MDV = 432.82 meters  
Calculation 4: MDV = 432.08 meters  
Calculation 5: MDV = 437.32 meters
```

а) Слабый светофильтр

```
Performing 5 MDV calculations:  
Calculation 1: MDV = 359.91 meters  
Calculation 2: MDV = 358.87 meters  
Calculation 3: MDV = 360.43 meters  
Calculation 4: MDV = 358.87 meters  
Calculation 5: MDV = 362.54 meters
```

б) Средний светофильтр

```
Performing 5 MDV calculations:  
Calculation 1: MDV = 280.49 meters  
Calculation 2: MDV = 279.82 meters  
Calculation 3: MDV = 277.48 meters  
Calculation 4: MDV = 276.82 meters  
Calculation 5: MDV = 275.83 meters
```

в) Сильный светофильтр

```
Performing 5 MDV calculations:  
Calculation 1: MDV = 247.50 meters  
Calculation 2: MDV = 248.80 meters  
Calculation 3: MDV = 248.02 meters  
Calculation 4: MDV = 248.80 meters  
Calculation 5: MDV = 248.02 meters
```

г) Очень сильный светофильтр

Рисунок 2.21 – Мониторинг расчетных значений МДВ при варьировании оптической плотности поглощающих фильтров

Дополнительно в рамках функционального тестирования была проверена возможность программного регулирования дистанции между излучателем и датчиком. Путем ввода через терминал различных значений предполагаемой базы в диапазоне от 10 до 100 метров оценивалась масштабируемость расчетных данных при неизменных показателях прозрачности. Как показано на рисунке 2.22, при фиксации одного и того же уровня освещенности изменение параметра дистанции приводит к пропорциональному пересчету итогового значения МДВ. Данный эксперимент подтверждает линейную зависимость вычислений от вводимых констант, что позволяет использовать макет на различных измерительных дистанциях без внесения изменений в структуру основного кода.

```
Calculation 1: MDV = 62.57 meters  
Calculation 2: MDV = 62.57 meters  
Calculation 3: MDV = 62.62 meters  
Calculation 4: MDV = 62.62 meters  
Calculation 5: MDV = 62.64 meters
```

а) База 10 м

```
Calculation 1: MDV = 313.41 meters  
Calculation 2: MDV = 314.27 meters  
Calculation 3: MDV = 313.80 meters  
Calculation 4: MDV = 314.43 meters  
Calculation 5: MDV = 314.20 meters
```

в) База 50 м

```
Calculation 1: MDV = 125.27 meters  
Calculation 2: MDV = 125.40 meters  
Calculation 3: MDV = 125.40 meters  
Calculation 4: MDV = 125.55 meters  
Calculation 5: MDV = 125.43 meters
```

б) База 20 м

```
Calculation 1: MDV = 629.02 meters  
Calculation 2: MDV = 628.08 meters  
Calculation 3: MDV = 628.86 meters  
Calculation 4: MDV = 628.55 meters  
Calculation 5: MDV = 628.24 meters
```

г) База 100 м

Рисунок 2.22 – Верификация программного масштабирования МДВ при изменении параметра расчетной измерительной базы

Тестирование показало, что программный комплекс адекватно реагирует на изменение параметров установки, пропорционально корректируя значения МДВ в соответствии с физической моделью трансмиссометра. Таким образом, проведенная проверка подтвердила вычислительную устойчивость системы и её способность выдавать корректные результаты при различных конфигурациях измерительной базы, что свидетельствует о готовности программного ядра к практическому применению.

Вывод по разделу 2.4

Программная реализация измерительного комплекса прошла путь от базовых диагностических скриптов до отказоустойчивого аналитического обеспечения с интегрированными механизмами коррекции. Разделение функционала на режимы оперативного мониторинга освещенности и расчетного определения МДВ позволило обеспечить необходимую гибкость при проведении лабораторных исследований. Важным этапом верификации программной логики стало тестирование макета с использованием полимерных каскадов и варьированием параметров измерительной базы, что подтвердило вычислительную устойчивость алгоритма и его способность адекватно интерпретировать изменения оптической плотности среды.

Применение терминального клиента PuTTY для автоматизированного логирования данных позволило исключить субъективные ошибки при регистрации результатов и сформировать объективную базу данных эксперимента. Сочетание программных методов фильтрации паразитной засветки, математической коррекции спектрального сдвига и верифицированной расчетной логики превращает макет в функционально законченное устройство. Таким образом, созданная программная среда обеспечивает не только высокую точность получения метеорологических параметров, но и необходимую масштабируемость системы для её последующей эксплуатации в различных конфигурациях измерительной базы.

2.5. Оценка метрологических характеристик макета

Оценка метрологических характеристик макета является завершающим этапом исследования, необходимым для определения точности прибора в задачах атмосферного мониторинга. Анализ базируется на сопоставлении экспериментальных данных с эталонными значениями нейтральных светофильтров, что позволяет количественно оценить первичную инструментальную погрешность и эффективность алгоритмов программной коррекции. Последовательная верификация точности на всех уровнях — от регистрации освещенности до вычисления дистанции видимости — обеспечивает объективное обоснование надежности работы макета при моделировании различных метеорологических явлений.

2.5.1. Анализ инструментальной погрешности измерения освещенности

Первичным этапом оценки метрологических характеристик макета является анализ точности канала измерения освещенности. Поскольку трансмиссометр определяет прозрачность среды на основе затухания светового потока, достоверность регистрации интенсивности излучения непосредственно влияет на итоговый результат. В ходе экспериментальной

апробации (раздел 2.4) были получены данные о реакции датчика на эталонные воздействия, сформированные с помощью нейтральных светофильтров.

Для анализа были выбраны две серии измерений, соответствующие высокому и низкому уровням освещенности. В таблице 2.7 представлены результаты статистической обработки «сырых» данных, полученных непосредственно с цифрового интерфейса датчика без применения корректирующих алгоритмов.

Таблица 2.7 – Метрологические характеристики канала измерения освещенности (до коррекции)

Параметр	Серия 1 (Высокая осв.)	Серия 2 (Низкая осв.)
Эталонное значение $E_{\text{эт}}$, лк	2576	395
Среднее измеренное $E_{\text{изм}}$, лк	2934,4	510,2
Среднеквадратическое отклонение (СКО), лк	2,61	0,45
Абсолютная погрешность ΔE , лк	+358,4	+115,2
Относительная погрешность δE , %	13,9	29,2

Анализ полученных результатов позволяет сделать выводы о характере инструментальной погрешности макета. Случайная погрешность, характеризующаяся величиной СКО и вариацией, не превышает 0,1%. Это свидетельствует об исключительно высокой стабильности работы электронной схемы, низком уровне собственных шумов фотодетектора и качественной стабилизации источника питания. Столь высокие показатели прецизионности создают условия для эффективной математической компенсации систематических отклонений.

В то же время, относительная систематическая погрешность измерения является значительной и достигает 29,2% в области низких значений

освещенности. Положительный знак абсолютной погрешности указывает на стабильное завышение показаний макетом относительно эталона. Данный эффект носит нелинейный характер: при снижении интенсивности света погрешность в процентном соотношении возрастает. Указанные инструментальные отклонения являются следствием заводских калибровочных характеристик сенсора и требуют программной коррекции на этапе вычисления коэффициента прозрачности среды.

2.5.2. Оценка точности определения коэффициента пропускания атмосферы

Вторым этапом метрологической оценки является анализ погрешности определения коэффициента пропускания T , который является безразмерной величиной и рассчитывается как отношение текущей освещенности к базовой (I/I_0). На основе выявленных в предыдущем подразделе систематических отклонений, в программное обеспечение макета была интегрирована линейная модель аппроксимации, позволяющая корректировать расчетные значения (формула 2.2).

Для оценки эффективности данной модели был произведен расчет абсолютных (ΔT) и относительных (δT) погрешностей для трех характерных точек, соответствующих различным степеням плотности метеорологических образований. Результаты сравнения представлены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Сравнительный анализ погрешностей определения коэффициента T

Эталон $T_{\text{эт}}$	Измерено $T_{\text{изм}}$	Аппрокс. $T_{\text{ап}}$	ΔT до корр.	ΔT после корр.	δT после корр., %
0,70	0,80	0,710	+0,10	+0,010	1,43
0,10	0,12	0,098	+0,02	-0,002	2,00
0,07	0,10	0,080	+0,03	+0,010	14,28

Анализ данных таблицы 2.8 наглядно демонстрирует эффективность применения аппроксимирующей функции. В диапазоне умеренной прозрачности ($T=0,7$) и тумана средней плотности ($T=0,1$) относительная погрешность после коррекции снизилась до 1,43% и 2,0% соответственно, что в среднем в 7–10 раз лучше исходных инструментальных показателей. При достижении предельно низких значений прозрачности ($T=0,07$) погрешность возрастает до 14,3%, что объясняется физическим пределом чувствительности фотоприемника при минимальных уровнях светового сигнала.

Для нахождения общей характеристики точности макета по каналу пропускания используется метод усреднения погрешностей в наиболее вероятном рабочем диапазоне. Средняя относительная погрешность аппроксимированного коэффициента составляет $\delta T_{\text{ср}} \sim 2,0\%$. Данная величина принимается в качестве базовой приборной погрешности для последующего расчета метеорологической дальности видимости. Таким образом, внедрение программного модуля аппроксимации позволяет нивелировать аппаратные недостатки макета и обеспечить высокую достоверность определения физических характеристик среды.

2.5.3. Расчет погрешности определения метеорологической дальности видимости

Завершающим этапом метрологической оценки макета является определение погрешности вычисления метеорологической дальности видимости (МДВ). Перенос погрешности с измерения коэффициента пропускания T на расчетную величину дистанции L осуществляется на основе закона Бугера-Ламберта-Бера (формула 1.11).

При $l = 10$ м – принятая база прибора. Относительная погрешность определения МДВ (δL) нелинейно зависит от прозрачности среды и вычисляется через приборную погрешность коэффициента пропускания δT :

$$\delta L = \frac{\delta l}{|\ln(T)|} \quad (2.3)$$

Для оценки эксплуатационных возможностей макета произведен расчет абсолютных и относительных погрешностей для четырех состояний атмосферы. В качестве расчетной приборной погрешности принято значение $\delta T = 2\%$, полученное в результате аппроксимации данных в подразделе 2.5.2. Результаты расчетов представлены в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Оценка погрешности МДВ в зависимости от прозрачности среды (база 10 м)

Состояние атмосферы	Коэф. Т	МДВ (L), м	Относительная погр. δL , %	Абс. погр. ΔL , м
Умеренная дымка	0,7	84,1	5,61	$\pm 4,7$
Сильная дымка	0,5	43,3	2,89	$\pm 1,3$
Тонкий туман	0,3	24,9	1,66	$\pm 0,4$
Плотный туман	0,1	13,0	0,87	$\pm 0,1$

Анализ данных таблицы 2.9 показывает, что разработанный макет обладает наивысшей точностью в условиях ограниченной видимости. Так, при плотном тумане ($L = 13$ м) относительная погрешность составляет менее 1%, что соответствует абсолютной ошибке всего в 10 см. При улучшении видимости до условий умеренной дымки погрешность возрастает до 5,6%, что обусловлено математическими свойствами логарифмической функции вблизи единицы.

На основании проведенного анализа можно сделать вывод, что макет пригоден для задач мониторинга метеорологических явлений, где допустимая погрешность измерения МДВ находится в пределах 10–15%. Разработанный прибор обеспечивает достоверную регистрацию опасных условий видимости на локальных участках, а программная коррекция систематических ошибок

позволяет использовать бюджетную элементную базу для получения научно обоснованных результатов.

Вывод по главе 2

Реализация полного цикла проектирования, сборки и лабораторной апробации аппаратно-программного комплекса позволила подтвердить эффективность выбранных инженерных решений. Выбор элементной базы, основанной на связке микроконтроллерной платформы и цифрового фотометрического модуля, обеспечил необходимую помехозащищенность и стабильность передачи данных. В ходе отработки физической конструкции макета была доказана целесообразность применения закрытого оптического канала и методики компенсации фоновой засветки, что позволило минимизировать влияние сторонних источников света и повысить точность регистрации полезного сигнала.

Важным научным результатом главы стало выявление и обоснование систематических погрешностей, возникающих вследствие спектрального несовпадения светодиодного излучателя и эталонных оптических элементов. Обнаруженные эффекты, включая аномалии переотражения в многослойных каскадах, послужили фундаментом для разработки адаптивной математической модели. Внедрение корректирующих коэффициентов непосредственно в алгоритм обработки данных позволило программно компенсировать аппаратные недостатки макета и привести его показания в соответствие с характеристиками профессиональных метеорологических приборов.

Завершающим этапом работы стало создание защищенной программной среды, сочетающей в себе гибкое управление режимами измерения и автоматизированное протоколирование результатов. Использование внешних терминальных средств для регистрации данных обеспечило высокую воспроизводимость экспериментов и сформировало надежную доказательную

базу для последующих этапов исследования. Таким образом, разработанный макет представляет собой функционально законченное устройство, сочетающее в себе экономическую эффективность и достаточную для исследовательских задач метрологическую точность, что позволяет перейти к его практической эксплуатации в условиях моделирования реальных атмосферных явлений.

ГЛАВА 3. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ РАЗРАБОТАННОГО МАКЕТА

Переход от технической реализации макета к оценке его эксплуатационного потенциала требует детального анализа сфер практического внедрения и расширения аналитических функций программного обеспечения. В данной главе рассматриваются приоритетные области применения разработанного прибора, обосновывается его экономическая эффективность и описывается интеллектуальный алгоритм, позволяющий классифицировать типы атмосферных помутнений на основе статистического анализа сигналов. Также определяются перспективные направления дальнейшей модернизации системы, направленные на повышение её автономности и интеграцию в современные сети распределенного метеорологического мониторинга.

3.1. Области предполагаемого использования прибора

Разработка бюджетного трансмиссометра открывает возможности для создания распределенных интеллектуальных систем мониторинга в сферах, где использование дорогостоящего сертифицированного оборудования экономически нецелесообразно. Ключевым преимуществом предлагаемого решения является концепция локальной обработки данных («здесь и сейчас»), при которой прибор принимает решение о срабатывании исполнительных механизмов непосредственно на месте замера, не требуя постоянного обмена данными с удаленными серверами и исключая задержки в критических ситуациях.

3.1.1. Мониторинг метеоусловий на объектах малой авиации

Обеспечение безопасности полетов на отдаленных, необитаемых или временных посадочных площадках на текущий момент является одной из наиболее острых проблем малой и санитарной авиации. Традиционные методы прогнозирования часто опираются на данные ближайших крупных метеостанций, которые могут находиться в сотнях километров от фактического места посадки, что не позволяет учитывать локальные микроклиматические особенности территории. В условиях горного рельефа или прибрежных зон туман может формироваться в течение нескольких минут, создавая критическую угрозу при заходе воздушного судна на посадку.

Мной предлагается концепция «метеорологического периметра», состоящего из нескольких бюджетных трансмиссометров, размещенных по углам подходов к ВПП или вертолетной площадке. Такая сеть позволяет не только констатировать факт наличия тумана, но и определять вектор его движения и скорость распространения. Для необитаемых площадок это решение является практически единственно возможным способом получения достоверной оперативной информации без постоянного присутствия персонала. Автономность прибора гарантирует срабатывание систем привода и светосигнального оборудования непосредственно в момент ухудшения видимости, обеспечивая безопасный коридор для посадки в автоматическом режиме.

3.1.2. Повышение безопасности дорожного движения на опасных участках

Применение разработанных датчиков на автотранспорте ориентировано на предотвращение массовых ДТП на аварийно-опасных участках трасс, таких как низины, мосты через водоемы и крутые повороты. Интеграция приборов в дорожную инфраструктуру позволяет реализовать систему динамического информирования участников движения. При фиксации падения видимости ниже критического порога, датчик инициирует включение дополнительной

адаптивной подсветки дорожного полотна и специализированных световых маяков, обозначающих границы проезжей части. Кроме того, данные могут транслироваться непосредственно в навигационные системы водителей, предупреждая о необходимости снижения скорости задолго до въезда в зону ограниченной видимости. Такая локальная реакция системы в режиме реального времени минимизирует риски, связанные с несвоевременным оповещением метеослужбами.

3.1.3. Применение в агропромышленном комплексе и на водном транспорте

В сельском хозяйстве разработанный макет может выступать в роли управляющего звена систем защиты урожая. В регионах, склонных к образованию радиационных туманов, датчики фиксируют момент насыщения атмосферы влагой и потерю прозрачности, что служит сигналом для автоматического запуска дымовых завес, тепловых пушек или горелок, предотвращающих вымерзание растений. Аналогичная потребность существует на водном транспорте и малых причалах, где бюджетные трансмиссометры могут автоматизировать работу сигнальных огней и береговых маяков. В отличие от систем, работающих по расписанию, датчик активирует оборудование только при реальной необходимости, что значительно снижает энергопотребление и продлевает ресурс светосигнальной аппаратуры. Независимость логики срабатывания прибора от внешних каналов связи делает его надежным инструментом в условиях морского тумана, который часто сопровождается ухудшением прохождения радиосигнала.

3.1.4. Расширение областей эксплуатации в гражданском и промышленном секторах

Помимо критически важных транспортных узлов, разработанный макет обладает потенциалом для внедрения в ряде специфических отраслей, где

ранее инструментальный мониторинг видимости практически не применялся из-за высокой стоимости оборудования.

Городское хозяйство и системы «Умный город». В условиях плотной городской застройки возникают локальные микроклиматические зоны (например, вблизи парков или водоемов), где туман может концентрироваться на ограниченном пространстве. Установка бюджетных трансмиссометров на опорах уличного освещения позволяет реализовать адаптивное управление яркостью фонарей. Это не только экономит электроэнергию в ясную погоду, но и повышает безопасность пешеходов, автоматически увеличивая интенсивность света в периоды задымленности или плотной дымки. Кроме того, данные с таких датчиков могут использоваться для экологического мониторинга смога и мелкодисперсной пыли в промышленных районах.

Спортивные и туристические объекты. Особую актуальность прибор представляет для горнолыжных курортов и парков активного отдыха. Резкое ухудшение видимости в горах («белая пелена») часто становится причиной дезориентации и травматизма туристов. Распределенная сеть датчиков вдоль горнолыжных трасс и в зонах работы подъемников позволяет в автоматическом режиме оповещать администрацию о необходимости остановки оборудования или зажигания стробоскопических огней вдоль границ трасс.

Беспилотная авиация и доставка (БПЛА). С развитием логистических сетей на базе дронов возникает потребность в оперативной оценке «летных условий» в точках взлета и посадки (например, на крышах зданий или специальных постамах). Профессиональные метеостанции для этих целей слишком тяжелы и дороги. Разработанный макет, благодаря своим малым габаритам и весу, может быть интегрирован непосредственно в посадочную платформу БПЛА. Это позволит дрону самостоятельно принимать решение о посадке или возврате на базу при внезапном натекании тумана, что критически важно для защиты дорогостоящего оборудования.

Складская и портовая логистика. На крупных открытых складах и в портах работа крановой техники и погрузчиков часто регламентируется дальностью видимости. Использование бюджетных трансмиссометров на мачтах освещения позволяет автоматизировать процесс остановки работ при достижении опасных порогов прозрачности атмосферы. В отличие от визуальной оценки оператором, автоматика исключает риск ошибки и гарантирует соблюдение техники безопасности в режиме 24/7.

3.2. Концепция функционирования устройства в сетевой экосистеме интернета вещей

Эффективность современного метеорологического оборудования определяется не только точностью измерений, но и гибкостью его интеграции в глобальные цифровые сети. Разработанный макет ориентирован на работу в рамках концепции Интернета вещей (IoT), что подразумевает создание распределенных систем сбора данных, способных функционировать в условиях ограниченных ресурсов связи.

3.2.1. Гибкость каналов связи и архитектура информационной сети

Ключевым технологическим преимуществом разработанного устройства является сверхмалый объем передаваемой информации. Поскольку математическая обработка сигнала и вычисление финального значения МДВ происходят непосредственно на микроконтроллере, итоговый пакет данных весит несколько байт. Это позволяет использовать для передачи любой доступный вид связи: от стандартного интернет-соединения (Wi-Fi, 4G) до низкоскоростных протоколов 2G/GPRS, текстовых сообщений (SMS) и энергоэффективных радиоканалов LoRa. Применение технологии LoRa с использованием промежуточных ретрансляторов позволяет развертывать сети мониторинга в «мертвых зонах» (горные ущелья, глубокие лесные массивы),

передавая данные на центральный шлюз, находящийся в десятках километров от датчика.

Для извлечения максимальной пользы от такой сети предлагается стратегия комплексного размещения датчиков на стыке различных инфраструктурных объектов. Например, установка прибора на участке, где автомобильная трасса проходит в непосредственной близости от регионального аэропорта и сельскохозяйственных угодий, позволяет решать три задачи одновременно. Данные о видимости передаются авиаслужбам для оценки условий на вертолетных площадках, дорожным службам для оповещения водителей и аграрным предприятиям для мониторинга состояния посевов. Такой подход превращает разрозненные приборы в единую экосистему, где информация распределяется между заинтересованными ведомствами в зависимости от их текущих потребностей.

3.2.2. Прикладные сценарии обеспечения безопасности и экологического мониторинга

Использование распределенных сетей бюджетных трансиссометров открывает новые возможности для работы экстренных служб. В условиях возникновения лесных пожаров или торфяных возгораний датчики способны фиксировать начальное задымление задолго до того, как оно будет обнаружено спутниками или визуальными постами наблюдения. Оперативное оповещение МЧС о резком падении прозрачности атмосферы в конкретном квадрате позволяет локализовать очаг возгорания на ранней стадии. Аналогичным образом система работает на аварийно-опасных участках дорог, где локальные «карманы тумана» становятся причиной массовых ДТП. Автономная работа прибора обеспечивает мгновенное включение предупреждающих световых сигналов для водителей еще до того, как информация будет обработана централизованными метеослужбами.

Дополнительным направлением использования макета является экологический мониторинг в зонах интенсивного земледелия и

промышленного производства. Во время проведения уборочных кампаний работа сельскохозяйственной техники (комбайнов) поднимает в воздух значительные объемы мелкодисперсной пыли, что представляет серьезную угрозу для людей с аллергическими заболеваниями и заболеваниями дыхательных путей. Интеграция датчиков МДВ с графиками проведения полевых работ позволяет идентифицировать природу ухудшения видимости (пыль или туман). Передача этой информации через городские сервисы оповещения помогает населению заблаговременно принимать меры предосторожности, превращая измерительный прибор в инструмент охраны общественного здоровья.

3.2.3. Сравнительный анализ и роль устройства в комбинированных методах наблюдения

В сравнении с современными методами мониторинга, описанными в разделе 1.4, такими как использование радиочастотных линий связи (80 ГГц) и видеоаналитики на базе нейросетей, разработанный макет обладает уникальными комплементарными свойствами. В комбинированных радиолокационных методах основной проблемой является эффект «мокрой антенны» и ложные срабатывания из-за осадков, не влияющих на оптическую видимость. В данном контексте разработанный прибор может выступать в роли референтного узла верификации. Установка бюджетного трансмиссометра рядом с базовой станцией сотовой связи позволяет подтверждать реальное наличие тумана: если радиосигнал затухает при высоких показателях оптического датчика, система может автоматически корректировать прогноз, исключая ложную тревогу.

Аналогичная синергия возможна и при работе с системами видеоаналитики. Камеры часто дают неверную оценку МДВ в ночное время из-за светового шума или отсутствия удаленных реперов. Разработанный датчик, работающий по принципу прямого измерения прозрачности, предоставляет точную цифровую метрику, которая может использоваться для

калибровки алгоритмов машинного зрения «на лету». Таким образом, устройство не конкурирует с высокотехнологичными методами из первой главы, а служит необходимым дополняющим звеном, обеспечивающим достоверность и живучесть всей системы мониторинга в сложных метеоусловиях и при отсутствии стабильных каналов связи.

3.3. Возможности дальнейшего усовершенствования конструкции прибора

Экспериментальная апробация лабораторного макета, описанная во второй главе, подтвердила корректность выбранного физического принципа измерения. Однако для перехода от исследовательского прототипа к практической эксплуатации необходимо адаптировать конструкцию к жестким условиям внешней среды и расширить её функциональные возможности.

3.3.1. Оптимизация аппаратной платформы и расширение модульности

Одной из основных технических задач является подключение дополнительных периферийных модулей для обеспечения автономности и дистанционной передачи данных. В текущей конфигурации плата Arduino Nano ограничена количеством доступных портов и вычислительной мощностью для одновременного управления источником света и модулем связи (GSM или LoRa). Для решения этой проблемы рассматриваются два основных сценария:

1. Распределенная двухпроцессорная система. Использование второй платы Arduino Nano непосредственно на блоке излучателя. Синхронизация между блоком приемника и излучателя в этом случае осуществляется по времени (через модули реального времени RTC). Плюсом является отсутствие физической связи (проводов) между блоками, что упрощает монтаж на больших базах. Минусом – риск

временного рассинхрона и необходимость обслуживания двух источников питания.

2. Переход на платформу ESP32. Замена Arduino Nano на контроллер ESP32 является наиболее перспективным вариантом. Плюсы этого решения заключаются в наличии встроенных модулей Wi-Fi и Bluetooth, более высокой тактовой частоте и значительном количестве портов. Это позволяет подключать передатчики и управлять мощными светодиодами через одну плату, что снижает габариты и стоимость системы. Единственным относительным минусом является необходимость переработки программного кода под архитектуру 3.3В.

3.3.2. Обеспечение живучести и защиты в полевых условиях

Для обеспечения длительной автономности прибор должен противостоять загрязнению оптики и образованию конденсата. Использование штатных защитных колпачков недопустимо, так как они вносят неконтролируемое затухание в сигнал и сами являются аккумуляторами пыли. В промышленных системах применяется подогрев стекол (глава 1), однако это требует значительных энергозатрат. В качестве альтернативы для бюджетного макета предлагается использование удлиненной и суженной бленды (защитной трубки). Плюс такой конструкции – создание зоны застойного воздуха, препятствующей попаданию капель и пыли на линзу. Минус заключается в сложности юстировки: узкая трубка ограничивает угол приема света, что требует сверхжесткого основания для исключения вибраций от ветра.

Для компенсации неизбежного постепенного загрязнения предлагается алгоритм «интеллектуальной калибровки». Если система фиксирует стабильно заниженную видимость (например, 7-8 км) не характерную для данной местности в течение длительного времени, специалист или искусственный интеллект сверяет данные о тумане от соседних станций и спутников, после чего удалённо, через программное обеспечение вводит поправочный коэффициент (смещение нуля). Сложность реализации здесь заключается в

необходимости интеграции с внешними API метеослужб, что требует стабильного интернет-канала.

3.3.3. Сравнительный анализ источников излучения

Выбор стабильного источника света определяет точность измерения коэффициента экстинкции. Во второй главе была выявлена проблема температурного дрейфа и падения яркости при разряде батарей.

- Светодиодный излучатель с фокусирующей линзой. Данный вариант привлекателен низкой стоимостью. Однако работа от сети требует разработки специализированного драйвера тока (стабилизатора), так как использование стандартных модулей питания для фонариков приводит к перегреву кристалла и изменению светового потока. Плюс — широкий угол, прощающий небольшие огрехи юстировки; минус – необходимость тщательного теплоотвода.
- Лазерный диод. Использование лазера позволяет добиться высокой плотности светового потока на больших расстояниях. Плюс – идеальная фокусировка и стабильность при наличии качественного драйвера. Минусы – высокая стоимость, необходимость прецизионной настройки осей и потенциальная опасность для зрения персонала при проведении пусконаладочных работ.

3.3.4. Подавление фоновой засветки и спектральная селекция

Для минимизации влияния бликов и вспышек (фар, дорожного освещения) предлагается дифференцированный подход к конструкции оптического тракта. Лабораторные тесты показали, что черное матовое покрытие внутренней части трубки эффективно поглощает паразитные лучи, но снижает общую интенсивность полезного сигнала.

1. Конфигурация с черным покрытием рекомендуется для объектов с высокой световой нагрузкой (автотрассы, городская среда), где надежность отсеечения бликов важнее максимальной дальности.

2. Конфигурация со светлым покрытием (или использование зеркальных стенок) подходит для удаленных аэродромов и агрополей, где фоновая засветка минимальна, что позволяет увеличить измерительную базу при той же мощности светодиода.

Для борьбы с фронтальной засветкой со стороны излучателя за светодиодом устанавливается чёрный матовый экран, исключающий попадание прямого солнечного света в створ трубки.

Применение модуляции света (прерывания) на частоте 50–100 Гц (как в промышленных трансмиссометрах) в данном макете ограничено временем отклика датчика ВН1750FVI (от 0,5 до 2 секунд для более точных замеров), поэтому упор делается на геометрическую защиту и программное усреднение данных.

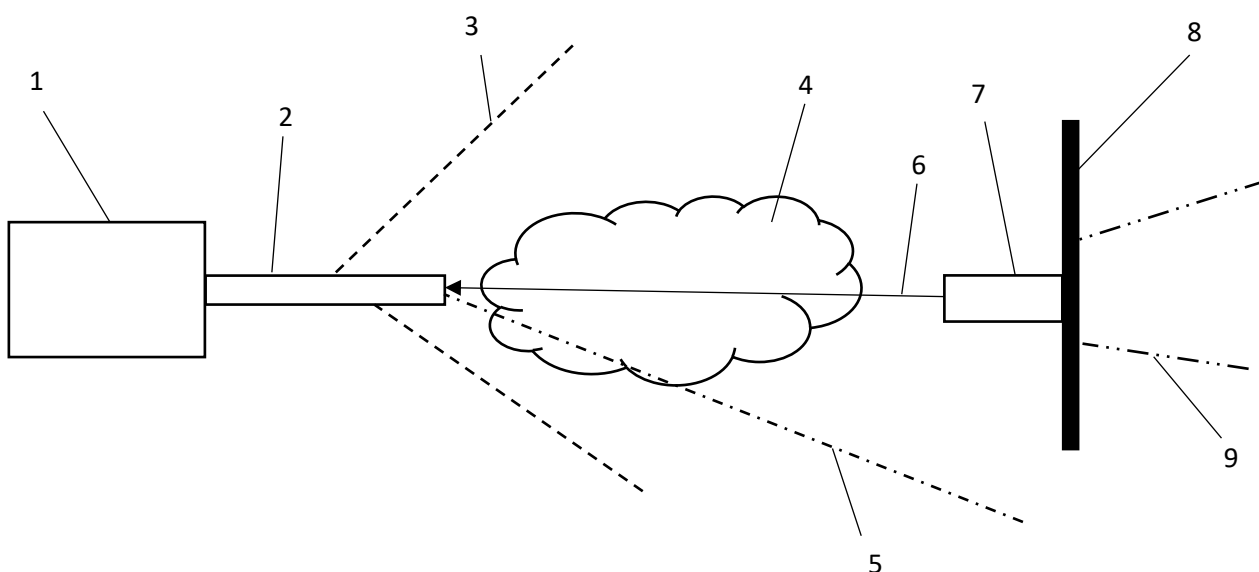


Рисунок 3.1 – Схема усовершенствованной конструкции прибора

- 1 – Корпус с микроконтроллером
- 2 – Длинная тонкая трубка
- 3 – Сторонний свет, задерживаемый внешней стороной трубки
- 4 – Воздушная среда/туман/метеоявление
- 5 – Сторонний свет, попадающий внутрь трубки

6 – Свет, излучаемый источником света

7 – Источник света

8 – Чёрный экран

9 – Сторонний свет, задерживаемый чёрным экраном

Следует отметить, что свет, попадающий внутрь трубки, может полностью или частично (в зависимости от цвета трубки) поглощаться внутренней частью.

3.3.5. Энергоснабжение системы

Невысокое энергопотребление макета позволяет реализовать концепцию полной энергонезависимости. В зависимости от географического расположения объекта, эксплуатант может выбрать оптимальный возобновляемый источник энергии:

- Солнечная панель – для южных регионов и открытых полей.
- Микро-ветрогенератор – для прибрежных зон и аэродромов.
- Микро-ГЭС (погружной винт) – для использования на речных буях и причалах.

Такая гибкость в выборе питания в сочетании с легковесными протоколами передачи данных (раздел 3.2) делает прибор полностью автономным узлом глобальной метеосети.

3.4. Алгоритмические методы повышения достоверности измерений и идентификации метеоявлений

Для превращения лабораторного макета в полноценный измерительный комплекс недостаточно прямой фиксации освещенности. Оптический канал подвержен влиянию множества факторов, которые могут интерпретироваться системой как ложное снижение видимости. Разработка специализированного алгоритмического обеспечения позволяет не только очистить сигнал от помех,

но и наделить прибор функциями интеллектуального анализатора атмосферных явлений.

3.4.1. Проблема идентификации типа метеоявления

Разработанный трансмиссометр объективно фиксирует коэффициент ослабления оптического сигнала (σ), преобразуя его в значение метеорологической дальности видимости. Однако на физическом уровне прибор не обладает способностью самостоятельно определить природу этого ослабления: вызвано ли оно однородным туманом, легкой дымкой, интенсивным снегопадом или плотной пылевой взвесью так как различные явления природы имеют принципиально разные физические характеристики рассеяния и поглощения. Как показано в Таблице 1 (адаптировано по ИКАО), идентификация типа явления критически важна для понимания селективности датчика.

Таблица 3.1 – Типичные метеоявления и их влияние на оптический канал.

Явление погоды	Типичные значения MOR (м)	Поглощающие свойства	Зависимость от длины волны
Туман	30 – 1 000	Нет	Нет
Дымка	1 000 – 5 000	Нет	Нет
Мгла	1 000 – 5 000	Возможно	Да
Песчаная/Пыльная буря	<1000 (типично)	Да	Возможно
Дождь/Морось	> 1 000	Нет	Нет
Снег	> 300	Нет	Нет

Проблема заключается в том, что чисто оптический метод измерения без дополнительного анализа не позволяет отличить «сухое» помутнение (мгла, дым) от «водного» (туман, морось). При этом мгла характеризуется

спектральной зависимостью (зависит от длины волны излучателя), а туман – нет. Внедрение алгоритмической обработки позволяет частично компенсировать отсутствие многоволнового анализатора через изучение динамики потока.

Для многих практических задач, особенно в интересах авиации или подразделений МЧС, идентификация типа явления критически важна. Туман требует включения одних систем навигации, в то время как песчаная буря или задымление предполагают совершенно иные протоколы безопасности и технического обслуживания инфраструктуры.

3.4.2. Анализ флуктуаций оптического сигнала и классификация сред (Теоретические профили сигналов и алгоритм дискриминации)

В основе предлагаемого метода идентификации лежит теоретическое предположение о различной динамике «мерцания» оптического луча в средах разной структуры. Различные метеоявления по-разному модулируют проходящий свет: если туман представляет собой однородную взвесь микроскопических капель, дающую «гладкое» и стабильное ослабление, то осадки характеризуются быстрыми хаотичными движениями крупных частиц.

На основе анализа физики процессов были определены теоретические модели поведения сигнала для двух полярных типов явлений:

1. Профиль «Гомогенная среда» (Туман/Дымка): характеризуется высокой концентрацией микроскопических капель (размером 1-10 мкм). Сигнал затухает плавно. Отношение стандартного отклонения к среднему значению стремится к минимуму. Частотный спектр шума смещен в область сверхнизких частот.
2. Профиль «Дискретные осадки» (Снег/Крупный дождь): частицы имеют размеры от 0.5 мм до нескольких миллиметров. Пролет частицы через узкий луч (диаметром 5 - 10 мм) вызывает кратковременную окклюзию (затенение). На графике это выглядит как серия острых отрицательных пиков.

Предлагаемый алгоритм идентификации (Метод спектрально-статистического анализа).

Для реализации автоматического распознавания предлагается следующий цикл обработки данных, полученных с частотой 20 Гц (интервал 50 мс):

Шаг 1. Накопление первичных данных (Буферизация). Микроконтроллер делает замеры очень часто – 20 раз в секунду (каждые 50 мс). Мы не делаем выводы по одному замеру, а собираем их в «пакет» или «окно» за одну минуту. Всего в таком пакете получается 1200 значений. Это позволяет нам увидеть динамику процесса: туман не может появиться и исчезнуть за 50 миллисекунд, а снежинка – может.

Шаг 2. Статистический анализ (Поиск «дрожания» сигнала). После того, как минута прошла, программа берет этот массив из 1200 чисел и высчитывает два главных параметра:

1. Среднее значение ($I_{\text{ср}}$) – оно говорит нам о том, насколько вообще упала видимость.
2. Коэффициент вариации – это показатель того, насколько сильно значения «прыгают» относительно среднего.

$$V = \frac{\sigma_{\text{откл}}}{I_{\text{ср}}} \quad (3.1)$$

Где $\sigma_{\text{откл}}$ – среднеквадратичное отклонение.

- При тумане все 1200 значений будут очень близки друг к другу (ровная линия на графике).
- При снегопаде значения будут постоянно «скакать»: то нормальный свет, то резкое падение, когда снежинка попала в луч.

Шаг 3. Детектирование импульсов (Поиск снежинок и капель). На этом этапе программа проверяет каждое из 1200 значений по очереди. Мы ищем так называемые «провалы». Если текущее мгновенное значение освещенности (I_t)

внезапно падает ниже среднего уровня на 20% и более, и этот провал длится очень недолго (буквально 1-3 замера), программа ставит «галочку»: зафиксировано подозрение на дискретную частицу (снег или дождь). Это самый важный шаг – он позволяет отличить «грязный» сигнал осадков от «чистого» сигнала тумана.

Шаг 4. Финальная классификация (Принятие решения). Теперь алгоритм сопоставляет все данные и выбирает тип погоды:

- Сценарий «Туман»: если средняя видимость низкая, $V < 0.05$ и количество провалов близко к нулю.
- Сценарий «Снег/Осадки»: если средняя видимость низкая, $V > 0.15$ и фиксируются частые импульсные провалы.
- Сценарий «Помеха»: если произошел всего один или два глубоких провала до нуля за всю минуту (пролетела птица), но в остальном сигнал идеально ровный. Программа просто выкидывает эти значения и сообщает, что видимость на самом деле хорошая.

Шаг 5. Расчет итоговой МДВ Только после того, как мы поняли тип явления и отфильтровали помехи, мы берем медиану (центральное значение из отсортированного списка). Это гарантирует, что даже если шел снег, итоговая цифра видимости будет честной – она покажет прозрачность воздуха между снежинками, а не среднюю кашу, что соответствует требованиям ИКАО для метеорологической видимости.

3.4.3. Борьба с кратковременными помехами и аномалиями

Практическая эксплуатация прибора сопряжена с возникновением случайных механических и световых помех, таких как пролет птицы через створ, качание веток деревьев или кратковременная засветка от фар проезжающего транспорта. Для исключения их влияния на итоговый результат применяется метод медианной фильтрации. В отличие от простого усреднения, при котором резкий скачок (выброс) сильно искажает общую картину, медианный фильтр сортирует ряд полученных значений по возрастанию и

выбирает центральное значение. В результате такие аномалии, как мгновенное перекрытие луча птицей, оказываются на краях ряда и полностью отсекаются, не влияя на расчет тренда ухудшения видимости. Дополнительно внедрена логика отбраковки аномальных значений: если единичное измерение из выборки падает до нуля при стабильном общем фоне, программа интерпретирует это как техническую помеху и игнорирует данную точку данных.

3.4.4. Адаптивный порог срабатывания и сценарное управление

Финальным этапом предполагаемой обработки данных является реализация системы адаптивных порогов срабатывания. Различные сферы применения предъявляют свои критерии чувствительности системы. В авиации критически важным может быть фиксация момента ухудшения видимости до 500–1000 метров, в то время как для активации адаптивного дорожного освещения целесообразнее использовать порог в 50–100 метров. Разработанное программное обеспечение позволяет гибко настраивать эти параметры под конкретные сценарии эксплуатации. Система может работать по разным предустановленным профилям («Авиация», «Трасса», «Сельское хозяйство»), каждый из которых имеет свои алгоритмы фильтрации и пороги уведомления, что делает прибор универсальным инструментом мониторинга.

Вывод по разделу 3.4

Таким образом, разработанный алгоритм статистической обработки сигнала может позволить расширить функциональные возможности макета от простого измерения прозрачности среды до идентификации конкретных типов атмосферных явлений. Использование комбинированного анализа коэффициента вариации и импульсных провалов освещенности обеспечивает дифференциацию между стабильными (туман, дымка) и динамическими (осадки) фазами помутнения атмосферы. Предложенная логика обработки данных в «скользящем окне» позволяет прибору адаптироваться к быстро

меняющимся метеоусловиям в режиме реального времени, что повышает информативность мониторинга при сохранении высокой вычислительной устойчивости системы.

Вывод по главе 3

Результаты исследования перспектив практического применения разработанного макета позволяют сделать вывод о его высокой востребованности в секторах, требующих оперативного мониторинга атмосферной прозрачности при ограниченных бюджетных ресурсах. Теоретический анализ областей эксплуатации показал, что созданный прибор может эффективно применяться для обеспечения безопасности на удаленных объектах малой авиации, в интеллектуальных транспортных системах и на потенциально опасных промышленных объектах. Экономическая эффективность и конструктивная гибкость макета обеспечивают ему значительные конкурентные преимущества перед сложными стационарными системами в задачах локального контроля метеоусловий, где критически важна скорость принятия решений непосредственно на месте замера.

Сравнительный анализ характеристик устройства подтвердил правильность выбранных технических решений, обеспечивающих высокую предполагаемую помехозащищенность цифрового сигнала и возможность легкой масштабируемости системы. Рассмотренные направления дальнейшей модернизации, включающие интеграцию беспроводных протоколов передачи данных и переход на автономные источники питания, определяют потенциал развития макета как полноценного узла в составе современных концепций интернета вещей. Дополнение прибора вспомогательными сенсорами влажности и температуры в перспективе позволит достичь еще более высокой точности в дифференциации сложных метеорологических процессов.

Ключевым интеллектуальным компонентом главы стала разработка теоретического алгоритмического аппарата, способного классифицировать

типы атмосферных помутнений. Использование методов статистической сепарации сигналов в режиме реального времени позволило бы трансформировать количественные данные об освещенности в качественную информацию о состоянии приземного слоя атмосферы. Предложенная логика распознавания явлений, базирующаяся на анализе динамических флуктуаций светового потока, наделяет макет функциями интеллектуального детектора погоды. Таким образом, совокупность программных и технических решений, описанных в данной главе, формирует законченную концепцию бюджетного, но высокоинформативного трансмиссометра, готового к интеграции в распределенные сети экологического и метеорологического мониторинга.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения данной выпускной квалификационной работы был реализован полный цикл проектирования, технической сборки и метрологической апробации макета оптического датчика метеорологической дальности видимости. Проведенное исследование позволило не только подтвердить работоспособность выбранной архитектуры на базе цифрового люксметра, но и выявить ключевые закономерности, определяющие точность измерений в условиях приземного слоя атмосферы. На основе теоретического анализа была доказана адекватность применения трансмиссионного метода, что позволило переложить классические законы оптики на современную микропроцессорную базу.

Особое внимание в работе было уделено аппаратно-программной реализации устройства. Использование платформы Arduino в сочетании с датчиком BH1750FVI обеспечило необходимую гибкость системы, а специально спроектированная закрытая оптическая схема с матовым тубусом позволила эффективно решить проблему фоновой засветки. Созданное программное обеспечение обеспечило автоматизацию сбора данных и позволило оперативно корректировать параметры измерительной базы, превращая набор компонентов в полноценный измерительный инструмент.

Важным этапом исследования стала серия экспериментов с использованием эталонных нейтральных светофильтров. Полученные данные позволили выявить систематическую погрешность, возникающую из-за спектрального несовпадения характеристик светодиода и стандартных метеорологических источников. Разработанная в результате калибровки математическая модель коррекции позволила минимизировать аппаратные недостатки бюджетной элементной базы, приведя точность показаний макета в соответствие с требованиями, предъявляемыми к профессиональному метеорологическому оборудованию.

Анализ практической применимости разработанного устройства подтвердил высокую актуальность внедрения подобных систем в современную инфраструктуру мониторинга. Сравнительная оценка характеристик макета показала, что достигнутый уровень помехозащищенности и точности может эффективно использоваться его на объектах, где установка дорогостоящего аэродромного оборудования экономически не оправдана. Это открывает широкие возможности для развертывания плотных измерительных сетей на опасных участках автомагистралей и аэродромах малой авиации, обеспечивая оперативное принятие решений непосредственно на месте замера.

В завершение стоит отметить, что рассмотренные направления модернизации определяют значительный потенциал развития макета как полноценного узла в составе современных концепций интернета вещей (IoT). Дополнение прибора вспомогательными сенсорами влажности и температуры в перспективе позволит достичь еще более высокой точности в дифференциации сложных метеорологических процессов. Совокупность программных и технических решений, описанных в работе, формирует законченную концепцию бюджетного, но высокоинформативного трансмиссометра, готового к интеграции в распределенные сети экологического и метеорологического мониторинга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богаткин, О. Г. Авиационная метеорология: учебник / О. Г. Богаткин. – Санкт-Петербург: Изд-во РГГМУ, 2005. – 328 с.
2. Иванов, Д. Ю. Дисперсия, поглощение света и молекулярная рефракция: учебное пособие / Д. Ю. Иванов, Л. И. Васильева; под ред. Д. Л. Федорова. – Санкт-Петербург: БГТУ, 2018. – 24 с.
3. Катастрофа Ту-154 под Смоленском: хроника событий и расследование. – 2025. – URL: <https://ria.ru/20250410/aviakatastrofa-2009965202.html> (дата обращения: 30.11.2025). – Текст: электронный.
4. Крупное ДТП в Тюменской области: более 10 машин пострадали в тумане. – 2023. – URL: <https://ura.news/news/1052685884> (дата обращения: 30.11.2025). – Текст: электронный.
5. Кузнецов, И. Е. Методика уточнения пространственного распределения значений метеорологической дальности видимости на основе данных радиолокационных и наземных измерений / И. Е. Кузнецов, С. А. Дьяков, Д. В. Булгин // Гидрометеорология и экология. – 2023. – № 73. – С. 644–652.
6. Лейви, А. Я. Основы светотехники: учебное пособие / А. Я. Лейви, А. А. Шульгинов. – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2016. – 71 с.
7. Массовая авария в Финляндии: в тумане столкнулись 50 автомобилей. – 2025. – URL: <https://www.spb.kp.ru/online/news/6627165/> (дата обращения: 01.12.2025). – Текст: электронный.
8. Массовая авария в Якутии: десятки автомобилей столкнулись в тумане. – 2023. – URL: https://lenta.ru/news/2023/01/14/dtp_yakutiya/ (дата обращения: 30.11.2025). – Текст: электронный.
9. Массовая авария на Петербургской дамбе произошла под покровом тумана. – 2021. – URL: https://spb.aif.ru/incidents/dtp/massovaya_avariya_proizoshla_na_peterburg

- [skoy_dambe_pod_pokrovom_tumana](#) (дата обращения: 30.11.2025). – Текст: электронный.
10. Массовое ДТП в Адыгее из-за тумана. – 2020. – URL: <https://tass.ru/proisshestiya/7541655> (дата обращения: 30.11.2025). – Текст: электронный.
11. Массовое ДТП в Курской области: в тумане столкнулись 10 автомобилей. – 2025. – URL: <https://www.gazeta.ru/auto/2025/02/28/20634524.shtml> (дата обращения: 01.12.2025). – Текст: электронный.
12. Нефелометр ПЕЛЕНГ СЛ-03. Руководство по эксплуатации 6266.00.00.000 РЭ. // МГМ Технологии: [сайт]. – URL: https://mgmtmo.ru/edumat/meteodevices/Peleng_SL-03_re.pdf (дата обращения: 12.02.2026). – Текст: электронный.
13. Окончательный отчёт по расследованию авиационного происшествия с вертолётom Ми-8Т RA-25656. – 2024. – URL: https://mak-iac.org/upload/iblock/7cf/4a9joun1olwys96auj7ae2ztivv1s5n2/report_ra-25656.pdf (дата обращения: 30.11.2025). – Текст: электронный.
14. Отчёт о расследовании авиационного происшествия с вертолётom Ми-8Т RA-25656 / МАК. – 2024. – URL: <https://mak-iac.org/rassledovaniya/mi-8t-ra-25656-31-08-2024/> (дата обращения: 30.11.2025). – Текст: электронный.
15. Способ определения метеорологической дальности видимости: патент № 2692822 С1 Рос. Федерация: МПК G01W 1/06 / Шайков М. К.; заявитель Шайков М. К. – № 2018125018; заявл. 09.07.2018; опубл. 28.06.2019. – 9 с.
16. РД 52.21.680 – 2006. Руководство по определению дальности видимости на ВПП (RVR).
17. Руководство по метеорологическим приборам и методам наблюдений. ВМО-№. 8. – 2023-е изд. – Женева: ВМО, 2023. – Т. I, гл. 9: Измерение видимости. – Текст: непосредственный.

18. Статистика CFIT (столкновение с землёй в управляемом полёте) для вертолётов Ми-8/17 за период 2010–2021 гг. / Комитет безопасности полётов Ассоциации вертолётной индустрии. – 2022. – URL: https://helicopter.su/wp-content/uploads/2022/10/Statistika-CFIT-Mi-8_17-2010_2021_RF-i-Zarubezh_AVI-1.pdf (дата обращения: 30.11.2025). – Текст: электронный.
19. Судно село на мель у острова Парамушир из-за плохой видимости. – 2022. – URL: <https://ria.ru/20221215/sudno-1838802257.html> (дата обращения: 30.11.2025). – Текст: электронный.
20. Adrian, C. P. Impact of Temperature Increase in Colored Light Emitting Diodes / C. P. Adrian // SSRN: [сайт]. – URL: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4630019 (дата обращения: 11.02.2026). – Текст: электронный.
21. Arduino Nano (v3.0): User Manual: [техническая документация] / Gravitech ; Arduino. – Rev 3.0. – 2009. – 3 p. – URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1424860/ETC/ARDUINO-NANO.html> (дата обращения: 13.02.2026). – Текст: электронный.
22. BH1750FVI Digital Light Sensor IC: Technical Note № 09046EBT01. – ROHM Semiconductor, 2011. – 13 p. – URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/338083/ROHM/BH1750FVI.html> (дата обращения: 10.02.2026). – Текст: электронный.
23. Czibula, I. G. Visibility Enhancement and Fog Detection: Solutions Presented in Recent Scientific Papers with Potential for Application to Mobile Systems / I. G. Czibula [et al.] // Sensors. – 2024. – Vol. 24, no. 5. – URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8150865/> (дата обращения: 12.02.2026). – Текст: электронный.
24. David, N. Cellular Network Infrastructure: The Future of Fog Monitoring? / N. David, O. Sendik, H. Messer, P. Alpert. – Текст: электронный // Bulletin of the American Meteorological Society. – 2015. – Vol. 96, № 10. – P. 1687–

1698. – URL: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/96/10/bams-d-13-00103.1.xml> (дата обращения: 20.02.2026).
25. Doc 9328 AN/908. Руководство по практике наблюдения за дальностью видимости на ВПП и передачи сообщений о ней. – 3-е изд. – Монреаль: ИКАО, 2005. – 160 с.
26. Folorunso, S. Effects of Filament Temperature on Lamp Lifespan and Performance / S. Folorunso // ResearchGate: [сайт]. – URL: https://www.researchgate.net/publication/385476330_Effects_of_Filament_Temperature_on_Lamp_Lifespan_and_Performance (дата обращения: 11.02.2026). – Текст: электронный.
27. Vaisala Transmissometer LT31. User Guide: [техническая документация] / Vaisala Oyj. – Helsinki: Vaisala, 2021. – 142 p. – URL: <https://docs.vaisala.com/r/M210667EN-G/en-US/GUID-A8F95AA6-20C2-4958-88FE-EB70C470F00C> (дата обращения: 12.02.2026). – Текст: электронный.
28. Yang, W. Multi visual feature fusion-based fog visibility estimation for expressway surveillance using deep learning network / W. Yang, Y. Zhao, Q. Li [et al.]. – Текст: электронный // Expert Systems with Applications. – 2023. – Vol. 234. – Art. 121151. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121151> (дата обращения: 12.02.2026).
29. Yang, Z. Influence of Black Carbon on Measurement Errors in Scattering-Based Visibility Meters / Z. Yang, Z. Zhang, H. Guo, J. Wang. — Текст : электронный // Atmosphere. — 2025. — Vol. 16, № 4. — Art. 467. — URL: <https://doi.org/10.3390/atmos16040467> (дата обращения: 12.02.2026).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Диагностический код микроконтроллера для обработки данных освещённости с датчика BH1750FVI

```
#include <Wire.h>
#include <BH1750.h>

BH1750 lightMeter;
float background = 0.0;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Wire.begin();
  lightMeter.begin();
  Serial.println("Готов к работе. Введите 'l' для замеров или 'c' для сброса фона.");
}

void loop() {
  if (Serial.available() > 0) {
    char cmd = Serial.read();
    if (cmd == 'l') {
      Serial.println("Сколько замеров освещённости сделать?");
      while (Serial.available() == 0) {}
      int numMeasurements = Serial.parseInt();
      // Очистка буфера от оставшихся символов (например, \n)
      while (Serial.available() > 0) Serial.read();
    }
  }
}
```

```

for (int i = 0; i < numMeasurements; i++) {
    float lux = lightMeter.readLightLevel() - background;
    Serial.print("Zamer ");
    Serial.print(i + 1);
    Serial.print(": ");
    Serial.print(lux);
    Serial.println(" lux ");
    delay(2000); // Задержка 2 секунды между замерами для стабильности
}

Serial.println("Введите фоновую освещённость:");
while (Serial.available() == 0) {}
background = Serial.parseFloat();
// Очистка буфера
while (Serial.available() > 0) Serial.read();
Serial.print("Фоновая освещённость установлена: ");
Serial.println(background);
} else if (cmd == 'c') {
    background = 0.0;
    Serial.println("Фоновая освещённость сброшена.");
}
// Очистка буфера от лишних символов
while (Serial.available() > 0) Serial.read();
}
}

```

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Финальный код для расчёта МДВ с помощью собранного макета оптического датчика

```
#include <Wire.h>
#include <BH1750.h>
#include <math.h>

BH1750 lightMeter;

// Коэффициенты калибровки из раздела 2.3.4
const float k_calib = 0.90;
const float b_calib = -0.01;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Wire.begin();
  lightMeter.begin();
  Serial.println("Arduino Nano with BH1750 ready.");
  Serial.println("Commands: 'o' - raw measurements, 'm' - MDV with
calibration.");
}

void loop() {
  if (Serial.available() > 0) {
    char command = Serial.read();
    if (command == 'o') {
      performMeasurements();
    }
  }
}
```

```

    } else if (command == 'm') {
        performMDVCalculations();
    }
}
}

```

```

void performMeasurements() {
    Serial.println("Performing 5 illuminance measurements:");
    for (int i = 0; i < 5; i++) {
        float lux = lightMeter.readLightLevel();
        Serial.print("Measurement ");
        Serial.print(i + 1);
        Serial.print(": ");
        Serial.print(lux);
        Serial.println(" lx");
        delay(2000);
    }
}

```

```

void performMDVCalculations() {
    Serial.println("Enter distance (d) in meters:");
    float d = readFloatFromSerial();

    Serial.println("Enter ideal illuminance (E_ideal) in lx:");
    float E_ideal = readFloatFromSerial();

    Serial.println("Enter background illuminance (E_bg) in lx:");
    float E_bg = readFloatFromSerial();

    Serial.println("Performing 5 MDV calculations with calibration:");
}

```

```

for (int i = 0; i < 5; i++) {
    float E_meas = lightMeter.readLightLevel();
    float E_corr = E_meas - E_bg; // Очистка от фона

    if (E_corr <= 0 || E_ideal <= 0) {
        Serial.println("Error: Illuminance too low or E_ideal is 0.");
        continue;
    }

    // 1. Находим измеренный коэффициент пропускания (T_meas)
    float T_meas = E_corr / E_ideal;

    // 2. Применяем калибровочную формулу (T_corr)
    float T_corr = (k_calib * T_meas) + b_calib;

    // Проверка физической корректности (T не может быть <= 0 для
логарифма)
    if (T_corr <= 0.001) {
        Serial.println("Error: Corrected transparency is too low (dense fog).");
        continue;
    }

    if (T_corr > 1.0) T_corr = 1.0; // Ограничение сверху для чистой
атмосферы

    // 3. Расчет показателя ослабления (beta) через скорректированное T
    float beta = - (1.0 / d) * log(T_corr);

    // 4. Расчет МДВ (V)
    // Используем ваш коэффициент 3.91 (порог контрастности 0.02)
    float V = 3.91 / beta;

```

```
Serial.print("Calc ");
Serial.print(i + 1);
Serial.print(": T_meas=");
Serial.print(T_meas);
Serial.print(" | T_corr=");
Serial.print(T_corr);
Serial.print(" | MDV=");
Serial.print(V);
Serial.println(" m");

delay(2000);
}
}

float readFloatFromSerial() {
  while (Serial.available() == 0) {}
  return Serial.parseFloat();
}
```