

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
«МЭИ»**

УДК:

Институт ИРЭ (ЭТФ)
Кафедра Светотехники
Направление Электроника и
наноэлектроника 16.04.04

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Программа: Теоретическая и прикладная светотехника

Тема: Разработка программы обработки результатов измерений
освещенности автомобильных дорог мобильным способом

Студент ЭР-04м-16 Кузьмин В.К.
группа *подпись* *фамилия, и., о.,*

Научный
руководитель проф. д.т.н Будаков В.П.
должность *звание* *подпись* *фамилия, и., о.,*

Консультант _____
должность *звание* *подпись* *фамилия, и., о.,*

Консультант _____
должность *звание* *подпись* *фамилия, и., о.,*

Магистерская диссертация допущена к защите

Зав.кафедрой К.Т.Н Боос Г.В.
звание *подпись* *фамилия, и., о.,*

Дата _____

Разработка программы обработки результатов измерений освещенности автомобильных дорог мобильным способом

Кузьмин В.К. стр.83, рис. 65, табл. 7, прил. 2

УДК

Аннотация

Исследованы пути дальнейшего развития и совершенствования мобильных методов измерения освещения дорог. Проведен анализ действующих алгоритмов обработки результатов измерений с выявлением основных их недостатков. Проанализированы и разработаны пути по их устранению. Разработана программа, позволяющая производить обработку результатов измерений мобильной светотехнической лаборатории по методу мониторинг дорожного освещения с возможностью нанесения результатов на карту. С помощью программы произведено сравнение результатов обработки различных алгоритмов расчёта нормируемых параметров освещенности дорог. Даны рекомендации по способам улучшения действующих методов с учётом возможностей современных светотехнических мобильных лабораторий.

The summary

The ways of further development and improvement of mobile methods for measuring road lighting are explored. The analysis of existing algorithms for processing the results of measurements with revealing their main shortcomings is carried out. The ways to eliminate them have been analyzed and developed. A program has been developed that allows processing the results of measurements of a mobile lighting laboratory using the method of monitoring road lighting with the possibility of plotting results on a map. The program compares the results of processing various algorithms for calculating the normalized parameters of road illumination. Recommendations are given on ways to improve existing methods, taking into account the capabilities of modern lighting mobile laboratories.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

«МЭИ»

Институт ИРЭ (ЭТФ) Кафедра Светотехники

Направление Электроника и наноэлектроника 16.04.04

ЗАДАНИЕ НА МАГИСТЕРСКУЮ ДИССЕРТАЦИЮ

по программе подготовки магистров Теоретическая и прикладная
светотехника

Тема Разработка программы обработки результатов измерений

освещенности автомобильных дорог мобильным способом

Время выполнения работы с 1.09.2016 по 10.06 20 18г.

Студент Кузьмин В.К. ЭР-04м-16
Фамилия, и., о. группа подпись

Научный руководитель проф. д.т.н Будак В.П.
должность, звание, фамилия, и., о.

Консультант _____
должность, звание, фамилия, и., о.

Консультант _____
должность, звание, фамилия, и., о.

Зав. кафедрой к.т.н Боос Г.В.
звание, фамилия, и., о., подпись, дата утверждения задания

Место выполнения научной работы «МСК БЛ ГРУПП»

Москва « _____ » _____ 2018 г.

1.Обоснование выбора темы диссертационной работы

В современном мире наблюдается всё больший рост объёмов дорожно-транспортной инфраструктуры. Безопасность на дорогах особенно в России была и остаётся очень важной проблемой во всём мире и не последнюю роль в этом играет дорожное освещение. В связи с чем потребность в качественных и быстрых измерениях дорожного освещения растёт. Мобильные методы измерения становятся всё более популярны в связи со своими очевидными преимуществами. Мобильные лаборатории разработанные и функционирующие в нашей стране технически ничуть не уступают своим зарубежным собратьям, однако они не реализуют свои возможности полностью. Поэтому представляется актуальным создание программы по обработке результатов измерений освещенности по методу мониторинга дорожного освещения и проведения анализа существующих и рассмотрением новых методов обработки результатов измерений.

Научный руководитель Будак В.П. **дата** _____

Студент Кузьмин В.К. **дата** _____

2. Консультации по разделу

Подпись консультанта _____ **дата** _____

3. Консультации по разделу

Подпись консультанта _____ **дата** _____

4. План работы над магистерской диссертацией

№ п\п	Содержание разделов	Срок выполнения	Трудоёмкость в %
I.	Теоретическая часть Изучение современных статических и мобильных методов светотехнических измерений, анализ, постановка задачи магистерской работы.	01.09.16-15.01.17	25%
II.	Практическая часть Разработка программы по обработке результатов мобильных измерений освещенности автомобильных дорог	15.03.17-01.06.17	25 %
III.	Экспериментальная часть Анализ различных методов обработки результатов измерений мобильной светотехнической лаборатории.	08.06.17-15.04.18	25%
IV.	Оформление диссертации	15.04.18-10.05.18	25%

5. Рекомендуемая литература

1. ОДМ Технические требования к мобильной светотехнической лаборатории. Методика измерения освещенности на дорожном покрытии, Федеральное дорожное агентство (Росавтодор), 2017
2. Живописцев И. Ф., Коробко А. А., Черняк А. Ш., Проблемы нормирования и контроля освещения российских автодорог и пути их решения, Светотехника № 6. 2011. Рр 12-15.
3. Korobko A.A., Chernyuk A. S., Improvement of mobile method for measurement illuminance of a road, 28th CIE Session 2015

6. Краткие сведения о студенте:

Домашний адрес 109559, г. Москва, ул. Совхозная, д. 18/2, кв. 132

Телефон служебный _____ домашний +7-916-711-14-28

1.1 Примечание: задание брошюруется вместе с диссертацией и с отзывами руководителя и рецензентов.

Содержание

Введение.....	9
1 Литературный обзор.....	11
1.1 Статистика.....	11
1.2 Освещение и ночные аварии	13
1.3 Современный мониторинг характеристик качества автомобильных дорог	14
1.4 Мобильные измерения качества освещения автомобильных дорог ...	17
1.5 МСЛ ВНИСИ	19
1.6 Нормативная база	26
1.7 Недостатки актуальных мобильных методов измерения и способы их совершенствования.	30
1.8 Мониторинг.....	34
1.9 Программно-измерительный комплекс ВНИСИ.....	36
1.10 Вывод.....	39
1.11 Цели и задачи.....	41
2 Теоретическая часть	42
2.1 Исходные данные	42
2.2 Определение расположения опор	47
2.3 Сведение данных с передних и задних датчиков.....	48
2.4 Расчёт нормируемых параметров	50
3 Практическая часть.....	52
3.1 Паспортизация дорог.....	52
3.2 Обработка	52
3.3 Выгрузка результатов.....	58
3.4 Итог	58
4 Экспериментальная часть	59
4.1 Измерения.....	59
Выводы	75
Список использованной литературы.....	77
Приложение А. Классы дорог и нормируемые значения.....	80
Приложение Б. Массивы рассчитанных нормативных параметров.	81

Список сокращений

ВНИСИ – Всесоюзный научно-исследовательский светотехнический институт им. С. И. Вавилова

БД – База данных

ДП – Дорожное покрытие

ДТП – Дорожно-транспортное происшествие

ИС – Источник света

ИТ – Информационные технологии

МКО – Международная комиссия по освещению

МСЛ – Мобильная светотехническая лаборатория

МСЛ (Е) – Мобильная светотехническая лаборатория для измерения освещённости

МСЛ-Софт (Е) – Специализированное программное обеспечение для компьютера, предназначенное для работы измерительной системы (сбор, обработка, хранение информации об измерениях)

ОП – Осветительный прибор

ОУ – Осветительная установка

ПДЛ – Передвижная дорожная лаборатория

ПК – Персональный компьютер

ПО – Программное обеспечение

ПЧ – Проезжая часть дороги

ФМУ – Фотометрическое мобильное устройство

ЯДП – Яркость дорожного покрытия

Введение

Главная цель наружного освещения на автомобильных дорогах – создание безопасных и комфортных условий видения для водителей в тёмное время суток. Поэтому основная задача состоит в обеспечении нормируемых показателей освещения дорог. Во всём мире для измерения светотехнических параметров установок утилитарного наружного освещения наряду со стационарным методом уже довольно давно успешно применяют мобильный способ. Установленная на специальный автомобиль аппаратура в силу её малоинерционности даёт возможность проводить измерения яркости и освещенности дорожного покрытия при движении автомобиля по дороге со скоростью до 60-70 км/ч, что исключает необходимость остановки и, как следствие временные заторы (пробки) в движении. Преимущества мобильных методов измерения очевидны, и поэтому вполне вероятно, что в ближайшее время традиционные статические методы будут полностью вытеснены.

Основные показатели, регламентируемые международными или национальными нормами освещения в большинстве стран, базируются на ЯДП в заданной точке. Однако ввиду особенностей климатических условий и исторически сложившейся практикой написания нормативной светотехнической базы вместо яркости, а иногда и одновременно с ней зачастую используют именно освещенность. Кроме того, именно мобильные методы измерения освещенности благодаря своей возможности практически полностью осуществить автоматизированный процесс обработки измерений большого числа объектов, могут быть использованы при мониторинге дорожного освещения.

Мониторинг дорожного освещения – это регулярный контроль состояния освещения исследуемых объектов путём измерения нормируемых параметров освещения с целью определения соответствий фактических значений указанных параметров нормативным значениям и в случае несоответствия представление рекомендаций по его устранению. Ведущий научно-технический центр российской светотехники «ВНИСИ» уже осуществляет измерение яркости и освещенности дорожного покрытия с помощью своей мобильной светотехнической лаборатории. Совмещая возможности МСЛ и современного программного обеспечения, становится возможно производить оценку освещения дорожного полотна не только по одному контрольному участку, а на протяжении всей длины дороги, осуществлять регулярный контроль состояния освещения исследуемых

объектов, а также иметь комплексную базу данных о состоянии всех измеренных объектов представленную в удобном для пользователя виде.

Такой подход позволил бы более продуманно и системно подойти к вопросу контроля качества дорожного освещения. Однако на сегодняшний день в отечественной метрологической практике мобильные методы измерений рассматриваются со стороны альтернативы статическим методам, заимствуя от них многие уже устоявшиеся правила и ограничения даже те от которых можно было бы избавиться. Тем самым, не реализуются в полной мере возможности современных мобильных измерений. Поэтому представляется актуальным создание программы по обработке результатов измерений освещенности, которая смогла бы реализовать обработку данных измерений МСЛ(Е) с целью реализации мониторинга дорожного освещения, а также проведение анализа существующих и рассмотрение новых алгоритмов обработки данных и расчёта нормативных параметров.

1 Литературный обзор

1.1 Статистика

В современном мире наблюдается всё больший рост единиц автомобильной техники. Ещё в 2010 году, стало известно, что число автомобилей, зарегистрированных в масштабах всего мира, перевалило за миллиард [1]. В России за последние 10 лет количество легковых автомобилей на дорогах увеличилось на 50%. «В 2007 году в России насчитывалось 28 млн легковых автомобилей, а в 2017 году автопарк превысил 42 млн» [2]. В больших городах изменения происходят ещё более динамично. В Москве по данным ГИБДД России [3] ежегодно становится на 8 - 10% автомобилей больше. Протяженность дорог в столице за последние 7 лет увеличилась на 16% [4], при этом обеспеченность российской столицы улично-дорожной сетью в два-три раза ниже, чем у любого другого мегаполиса мира. В среднем площадь территории Москвы, которую занимают дороги, всего 8%, на периферии показатели снижаются до 2 - 3% при европейской норме 15 - 20% [5]. В связи с чем темпы строительства будут только увеличиваться. «Свыше 100 км дорог, в том числе 20 эстакад, тоннелей, мостов и 16 пешеходных переходов будет построено в столице в 2018 году [6]».

В связи с чем, проблем, которые приходится решать в области планирования, проектирования и обслуживания дорожно-транспортной сети становится всё больше, а их характер обостряется.

Все действия направленные на улучшения состояния дорожно-транспортной сети направлены на увеличение безопасности на дорогах, то есть на уменьшение количества ДТП и смертельных случаев, связанных с ними. По данным Всемирной организации здравоохранения, ежегодно в мире в среднем гибнут в ДТП 18 человек на каждые 100 тыс. населения. ДТП – основная причина смерти людей в возрасте от 15 до 29 лет [7]. В структуре внешних причин смерти дорожно-транспортные происшествия в России в 2017 году уже делят второе место со смертью от самоубийств, уступая лишь фактору других внешних причин (рис. 1) [8].

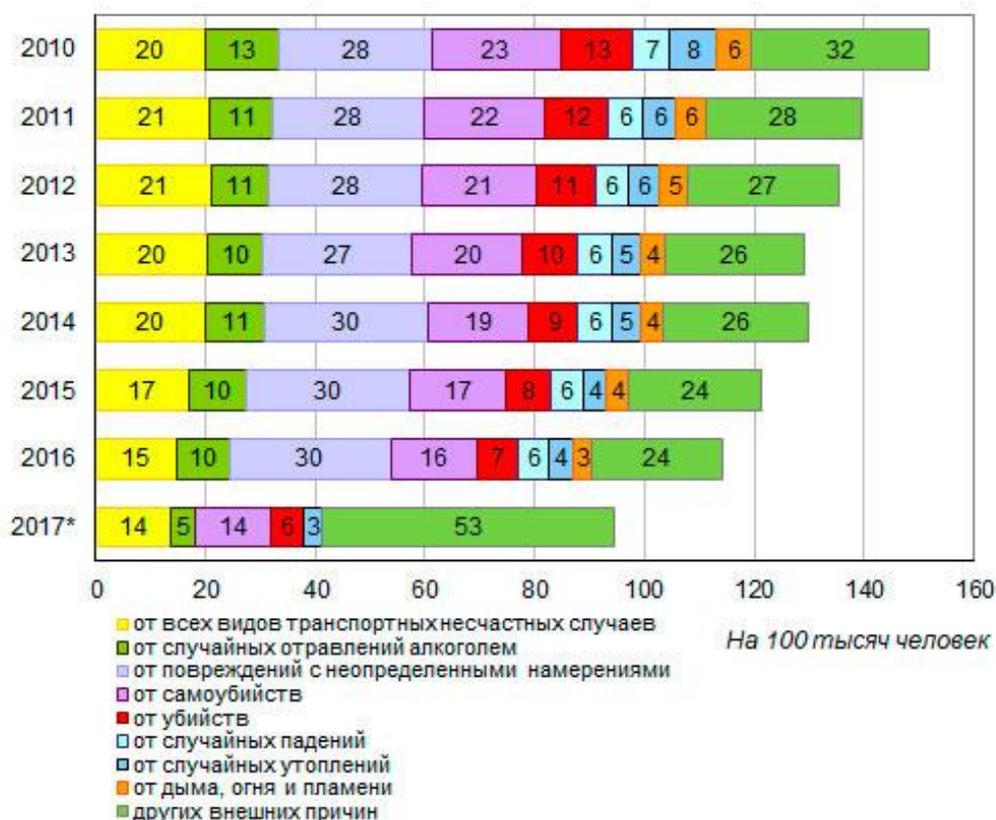


Рис. 1. Внешние причины смерти в России за 2017 г

В 2013 году «Высшей школой экономики» был подготовлен доклад «Безопасность дорожного движения в России: современное состояние и неотложные меры по улучшению ситуации» [9]

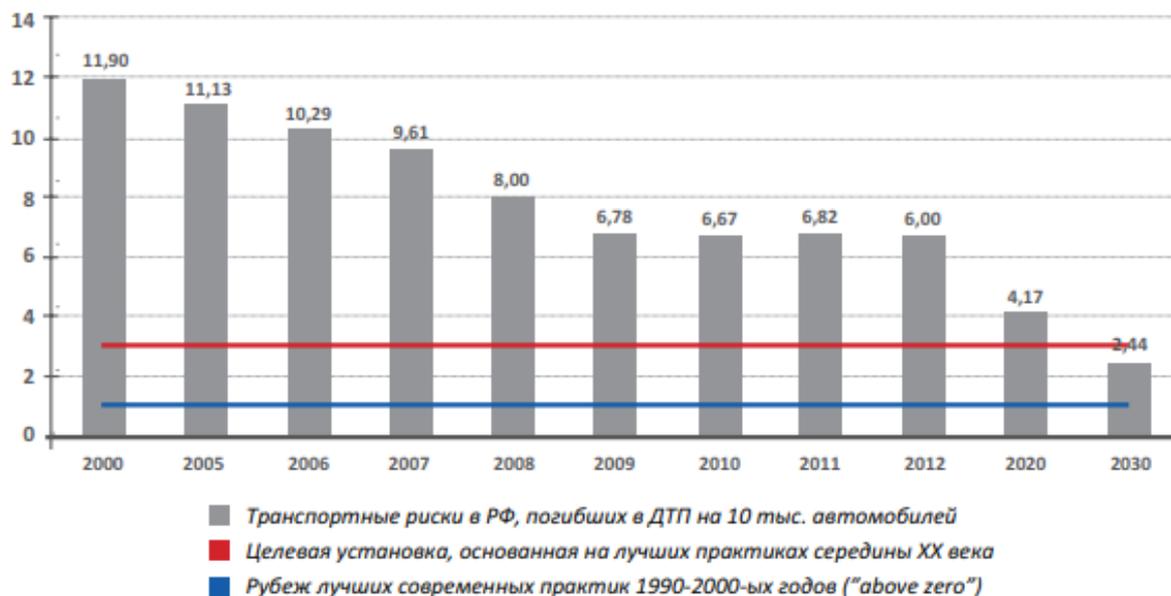


Рис. 2. Транспортные риски в РФ: факт; официальный прогноз; сравнение с мировыми практиками

Вероятность погибнуть или получить серьезные травмы в ДТП в России существенно выше, чем в любой развитой и в большинстве развивающихся стран мира (рис 2). По уровню безопасности на дорогах Россия отстает от лучших стандартов в 5–12 раз. И смертность на дорогах России в 3-4 раза выше, чем в развитых странах. По данным ГИБДД, только за один 2017 год страна потеряла погибшими 19 тыс. человек!

В этом докладе главной причиной сложившегося печального положения дел в России является, по мнению авторов доклада, оторванность отечественной практики обеспечения безопасности дорожного движения от научных и гуманитарных представлений, утвердившихся на протяжении XX века в развитых странах мира.

1.2 Освещение и ночные аварии

Одним их важнейших факторов, влияющих на безопасность движения на дорогах, является их освещённость в ночное время. По данным ГИБДД в России за 2017 год на тёмное время суток приходится 36% ДТП. Риск ДТП в темное время суток выше в среднем в 3-4 раза, чем в светлое время. Более высокий риск ДТП в темное время суток – общепризнанный факт с учетом пересчета количества ДТП на интенсивности движения, которая ниже дневной в несколько раз. Это может быть связано как с плотностью трафика, с уровнем алкогольной интоксикации, уровнем усталости водителя, так и с условиями видимости дороги. Очевидно, что эти показатели от дня к ночи могут сильно отличаться.

Дорожно-транспортные происшествия, происходящие в темное время суток, как правило, отличаются значительной тяжестью, причем наиболее характерными происшествиями являются столкновения автомобилей и наезды на пешеходов, т.е. такие, которые в основном зависят от видимости дороги.

Было проведено множество анализов аварий по всему миру, и отдельных исследований, которые пытались определить степень влияния освещения дорог на количество и качество ночных аварий [10]. Однозначной зависимости количества несчастных случаев на дороге от уровней освещённости до сих пор не удалось установить, однако многочисленные исследования во многих странах мира указывают что новое или улучшенное освещение приводит к сокращению ночных аварий в диапазоне от 13% до 75%.

Общим выводом Международной комиссии по освещению (МКО) является заключение, что необходимо правильное количество и качество освещения, используемое в местах где и когда оно выгодно. Свет имеет как преимущества, так и нежелательные побочные эффекты, поэтому

необходимо контролировать уровни освещения, чтобы обеспечить максимальный комфорт для водителя в то же время уменьшая отрицательные эффекты и затраты на электроэнергию.

1.3 Современный мониторинг характеристик качества автомобильных дорог

Любое решение в таких глобальных вопросах как инфраструктура города, должно опираться на реальные знания о положении дел, а любая законченная работа должна проходить проверку и находиться под дальнейшим наблюдением. Поэтому важной частью работы в сфере дорожно-транспортной сети является исследование различных характеристик качества автомобильных дорог.

На протяжении долгого времени исследования характеристик автомобильных дорог происходили исключительно статическими методами. Измерения проводились выездными бригадами на определенном участке дороги, где, как правило, происходило перекрытие дорожного движения, а результаты измерений протоколировались вручную. Однако увеличение дорожного трафика и объёма измерений потребовало создание новых, более быстрых и удобных методов измерений. Развитие современных компьютерных и измерительных технологий позволило создать мобильные лаборатории, с помощью которых можно проводить измерения прямо во время движения автомобиля по дороге со скоростью до 60-70 км. в час, что исключает необходимость остановки и, как следствие временные заторы (пробки) в движении.

Такие мобильные лаборатории для измерения качества дорожного покрытия уже довольно давно применяются во многих странах мира. На рисунках 3 и 4 представлены примеры используемых в настоящее время мобильных лабораторий по измерению качества дорожного покрытия.

Многочисленное измерительное оборудование, установленное на автомобиль (рис. 3), позволяет таким мобильным лабораториям измерять различные характеристики качества покрытия автомобильных дорог.

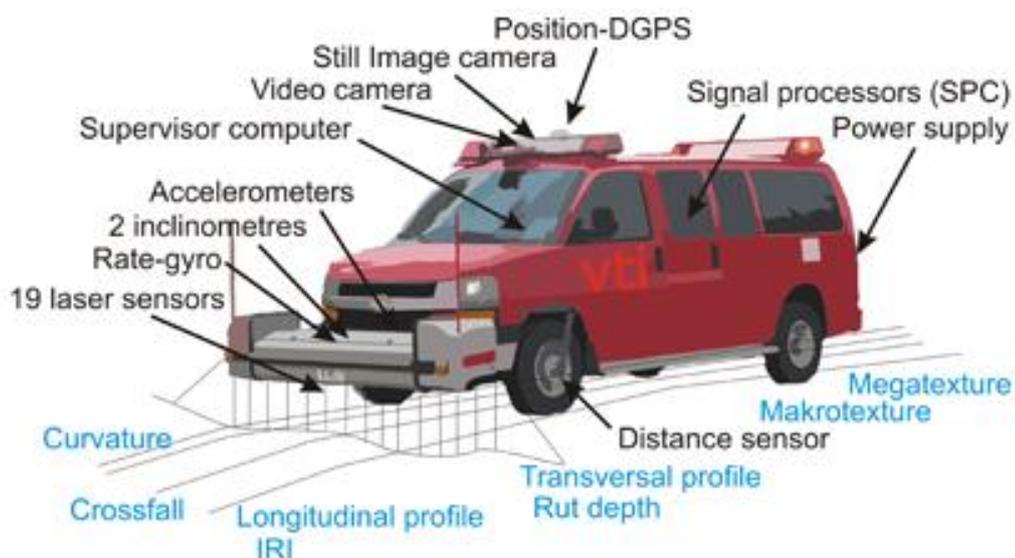


Рис. 3. Мобильная лаборатория по измерению качества дорожного покрытия [11]

Вся информация полученная таким образом записывается и обрабатывается автоматически и в последствии хранится в базе данных и может быть представлена как в виде единичных отчётов проведенных измерений, так и комплексных аналитических отчётов по нескольким проведенным измерениям и быть доступна как частным лицам, так и находиться в публичном доступе.

Такие системы позволяют проводить полноценную паспортизацию и мониторинг состояния дорожных инфраструктур большого объёма.

Так, например, в США целый штат Айова с помощью разработанной системы оценки состояния инфраструктуры (The Infrastructure Condition Evaluation (ICE)) находится под постоянным мониторингом отдела транспорта Iowa Department of Transportation (DOT) [12]. Она формируется на основе различных измерений качества дорожно-транспортной сети в большинстве случаев полученные с помощью мобильных измерений. Большая часть информации и аналитики доступна как на сайте отдела транспорта в виде таблиц, так и в виде специально разработанного интернет сервиса ICE tool [13].

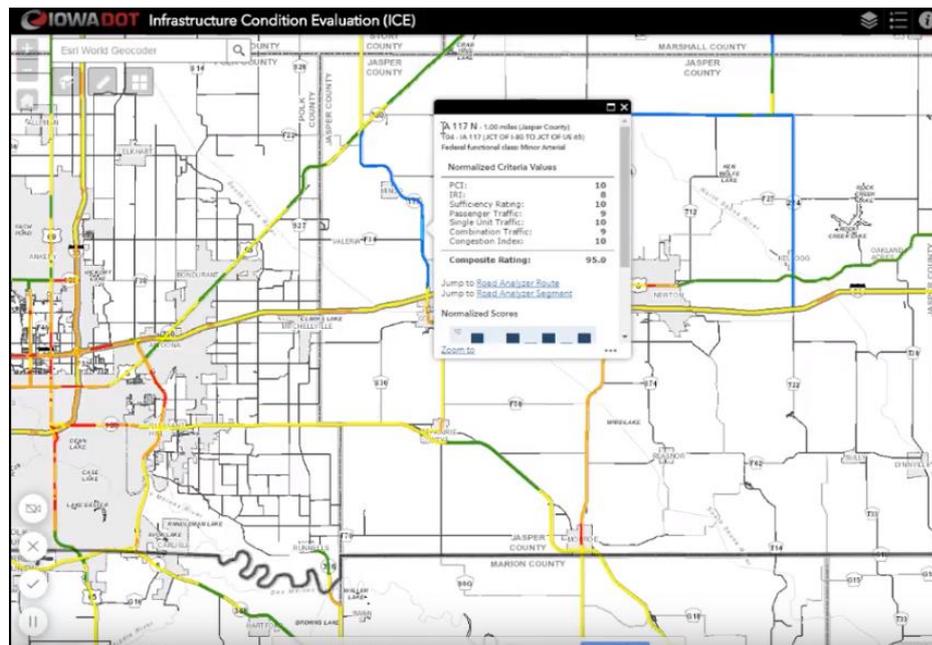


Рис. 4. Карта с отображаемой информацией по состоянию инфраструктуры

ICE tool представляет из себя портал который демонстрирует состояния инфраструктуры в Айове в виде карты (рис. 5) с возможностями статистического анализа и дополнительными инструментами. На карте информация отображается в виде слоёв данных, таких как: количество аварий, мосты, продольная ровность (IRI), индекс состояния дорожного покрытия(PCI), Composite Rating, уровень дорожного трафика, мосты, и т.д. Для данного портала существует как общий, так и частный доступ для определенных организаций, для которых отображается дополнительная информация с расчётом особых статистических показателей.

Например, для анализа состояния шоссе используется матрица VCAP (Value, Condition и Performance (Значение, состояние и производительность)) которая используется, чтобы помочь идентифицировать и расставить приоритеты кандидатам на улучшение грузовых перевозок в системе первичных дорог.

В конце каждого года (начиная с 2015) Iowa DOT публикует отчет о планировании шоссе дорог Highway Planning Report основанный на ICE, в котором даёт рекомендации градостроителям по улучшению найденных «узких» мест в дорожной инфраструктуре штата [14].

Таким образом современные технические и информационно-аналитические возможности позволяют достигнуть невиданной ранее автоматизации и структурированности разных типов измерений дорожно-транспортной сети.

1.4 Мобильные измерения качества освещения автомобильных дорог

Кроме мобильных измерений качества дорожного покрытия, на данный момент активно применяются и мобильные измерения качества освещения автомобильных дорог.

Установленное на автомобиль фотометрическое оборудование позволяет производить измерения, как яркости, так и освещённости дорожного полотна.



Рис. 6. Светотехническая мобильная лаборатория. Яркометр расположенный внутри кабины автомобиля

В 2005 г. некоторые европейские страны, например, Италия и Германия [15, 16], а в 2006 г. и Россия [17] (рис. 6) создали светотехнические мобильные лаборатории для контроля наружного освещения, что позволяет измерять яркость из движущегося автомобиля. Эти лаборатории основаны на фотометрических устройствах с высоким разрешением, так как они представляют собой комбинацию яркостной измерительной и высококачественной матрицы ПЗС и специально разработаны, откалиброваны и адаптированы для светотехнических измерений.

В настоящее время во многих странах мобильные лаборатории применяются для приёмосдаточных и инспекционных испытаний, различных исследований и мониторинга качества дорожного освещения. Приведем пример из последних разработок и исследований в этом направлении.

Разработанная в 2017 в США штат Вирджиния мобильная система мониторинга дорожного освещения Roadway Lighting Mobile Monitoring System (RLMMS) [18] представлена на рис.7.

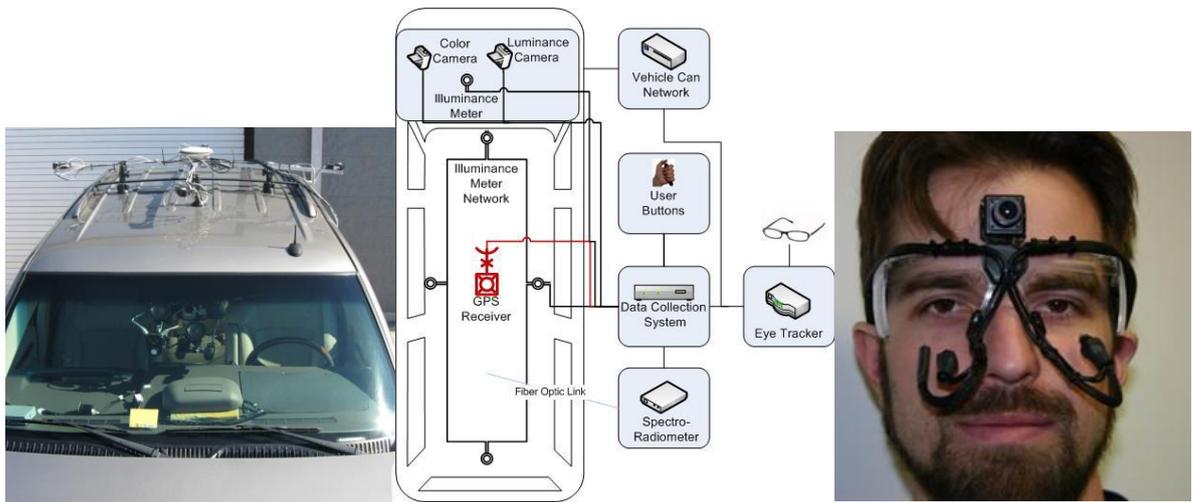


Рис. 7. США. Мобильная система мониторинга дорожного освещения, фото, КОМПОНЕНТЫ

Эта система уже продемонстрировала высокую производительность и имеет множество применений при оценке условий освещения дорог. По состоянию на июль 2017 года система измерила более 5000 миль освещения.

В качестве примера приведены результаты сбора данных из Minneapolis-St. Paul I-35 Bridge. (рис 8). Здесь изображена освещенность на каждой из пяти полос. Ожидается, что эти измерения будут проводиться каждые 3-6 месяцев для мониторинга изменений в системе освещения на мосту. Этот проект позволяет контролировать работу светодиодной системы в течение длительного периода времени, чтобы установить проектные факторы, связанные с изменениями грязи, пыли и досрочной поломки.

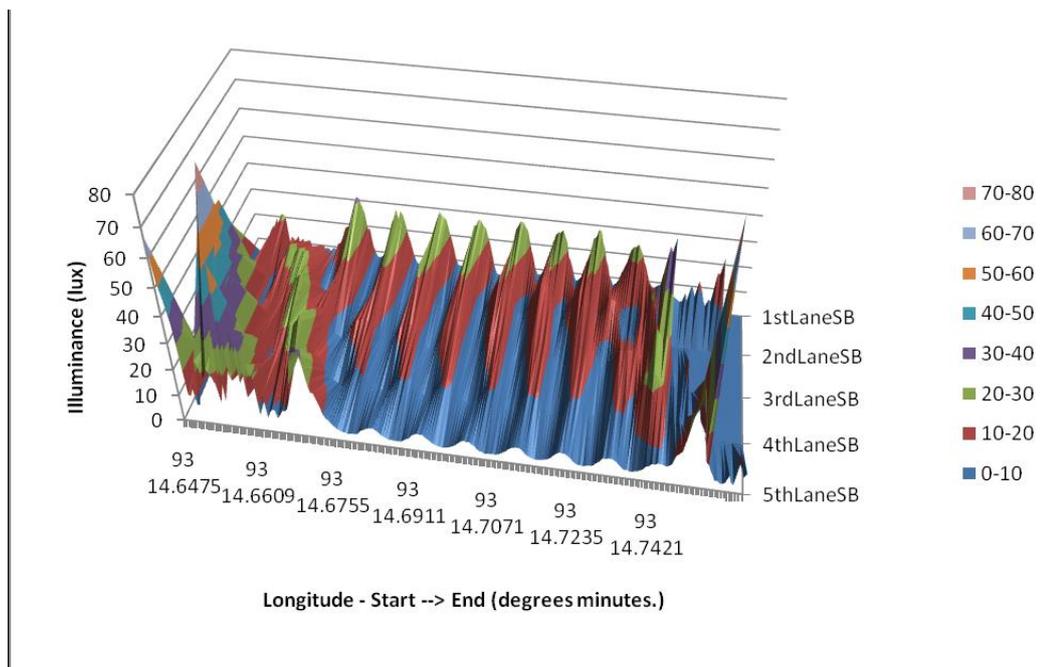


Рис. 8. Измерения освещенности на мосту.

Последнее исследование заключалась в сборе данных освещения и количественном определении влияния уровня освещенности на ночные аварии на 56 освещенных и 43 неосвещенных пересечениях дорог общего пользования в Вирджинии. [19]

В Новой Зеландии фирма Odyssey Energy разработали систему Lux Mapping System (LMS) [20] (рис.9)

LMS – это система по измерению и анализу уровня освещенности дорог с последующей визуализацией данных в виде картирования.



Рис. 9. Новая Зеландия. Мобильные измерения освещенности. Уровни освещенности, на карте города.

Система была успешно использована в течение 7 лет для проверки эффективности уличного освещения в Новой Зеландии и Австралии.

1.5 МСЛ ВНИСИ

Всесоюзный научно-исследовательский светотехнический институт им. С. И. Вавилова (ВНИСИ) разработали и активно применяют Мобильную светотехническую лабораторию (МСЛ) (рис. 10). Которая наряду с другими светотехническими параметрами установок наружного освещения позволяет проводить измерения освещенности и яркости дорожного полотна. Для этого на автомобиле устанавливаются ФМУ для измерения освещенности и фотояркоммер LMK5 для измерения яркости.



Рис. 10. Мобильная светотехническая лаборатория ВНИСИ. Яркомер установленный в кабине машины. Фотодатчики освещенности установленные на кузове машины [21]

Данные полученные с ФМУ обрабатываются в программе МСЛ-Софт, а изображения, полученные с фотояркомера, в программе LMK2000. Также параллельно производится считывание GPS координат и скорости автомобиля, с помощью соответствующих датчиков. После обработки данных формируется отчёт по проведённым измерениям.

Яркость

Яркомер LMK5 (рис. 7), расположенный внутри кабины автомобиля и разработанный компанией TechnoTeam совместно с Техническим университетом Ильменау [22], является основным инструментом для измерения яркости поверхности дороги от движущегося транспортного средства в соответствии с методом, установленным европейскими стандартами (рис 11).

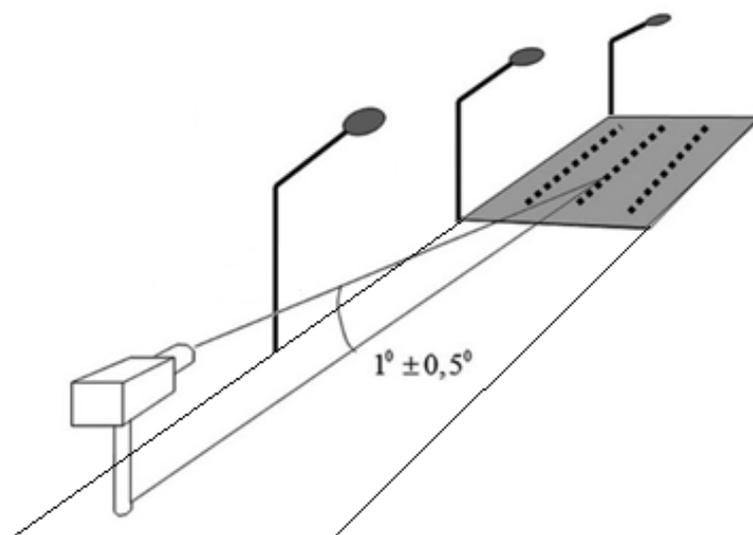


Рис. 11. Схема измерения яркости дорожного полотна с помощью яркомера

Также была разработана установка для реализации второго метода измерения яркости дорожного полотна с использованием тест образца [23] (рис. 12). Такой метод позволяет проводить измерения вне зависимости от состояния поверхности дороги (влажность, грязь, неукатанность).

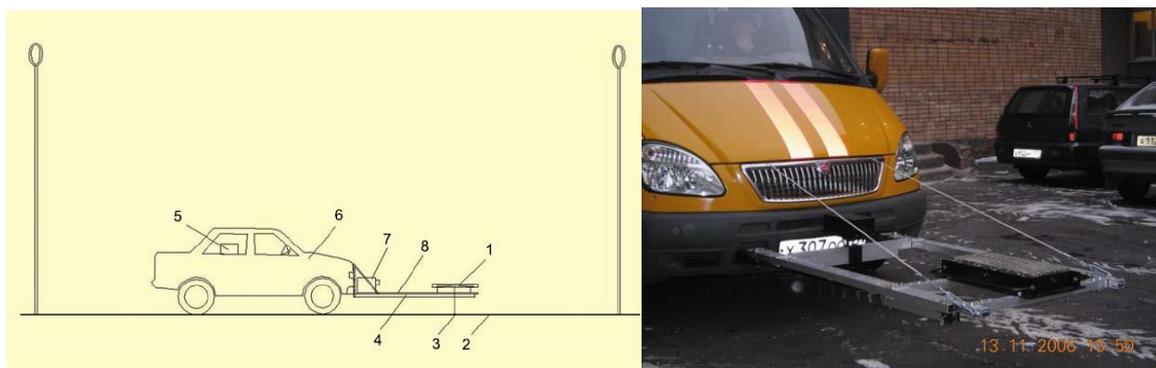


Рис. 12. Схема измерения яркости дорожного покрытия с использованием тест образца. 1 – эталонный образец; 2 – дорожное полотно; 3 – точка измерения; 4 – выносная консоль; 5 – регистрирующее устройство; 6 – автомобиль; 7 – яркомер; 8 – измерительное устройство

Запись и дальнейшая обработка данных осуществляется с помощью установленной на ноутбук программы LMK 2000, разработанной TechnoTeam.

Яркомер снимает яркостную картинку, с помощью которой затем в определенных точках сцены вычисляются значения яркость. Скорость съёмки данных при определенной скорости автомобиля зависит от мощности компьютера. И может достигать 1 изображения в секунду при скорости автомобиля до 80 км/ч.

После получения яркостных изображений дороги, отображенных в псевдоцветах в зависимости от яркости каждого пикселя с помощью программы LMK2000 оператором производится обработка изображения. Для этого на выбранном изображении строится многоугольник (рис. 13), на котором в соответствии со стандартом строится сетка с расчётными точками (рис. 14). Дальнейший расчёт будет выполнен автоматически. Протокол испытаний включает распределение яркости по выбранной дорожной области в табличных и графических формах (представление в псевдоцветах); средняя яркость поверхности дороги; общие и продольные коэффициенты однородности.



Рис. 13. Яркостное изображение объекта с выделенным полем измерения

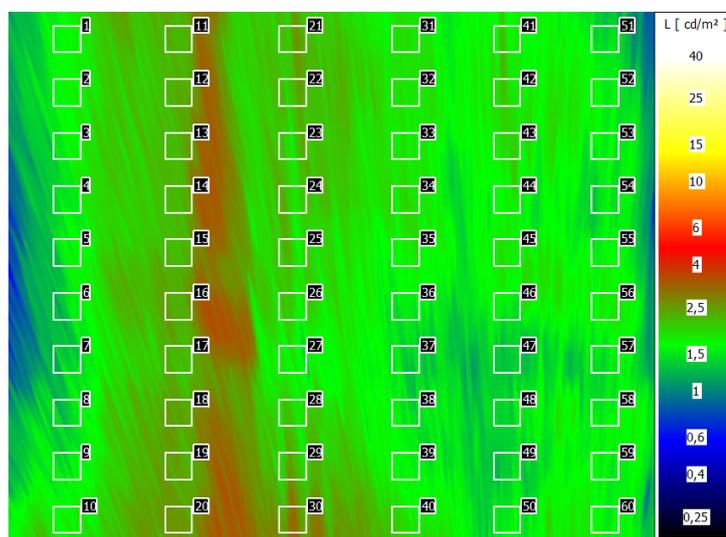


Рис. 14. Развертка поля измерения с указанием номеров расчетных точек

Освещенность

Мобильная светотехническая лаборатория по измерению освещенности (МСЛ (Е)) представляет собой реализацию рекомендуемого в публикации МКО СIE194:2011 [24] мобильного метода измерения освещенности с помощью «разнесенных в плоскости измерения приемников», установленных на автомобиль [25]

Измерения освещенности ДП выполняются в процессе движения методом фиксации значений с помощью ФМУ, установленных определенным образом снаружи транспортного средства. (рис. 15).

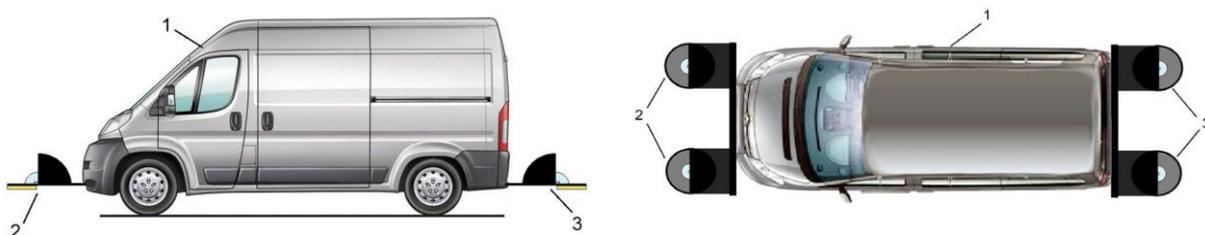


Рис. 15. Схема расположения ФМУ на автомобиле 1 – автомобиль; 2 – передние ФМУ; 3 – задние ФМУ.

Также производятся измерения GPS координат и скорости автомобиля, с помощью соответствующих датчиков.

МСЛ (Е) включает в себя следующее оборудование: ФМУ (4 шт.), персональный компьютер (ноутбук) с установленным ПО МСЛ-Софт (Е), датчик скорости, GPS-приемник, приспособления для установки, коммутации и питания элементов системы, источники питания, запасные части, инструменты, принадлежности. Функциональная схема МСЛ (Е) представлена на рисунке 16.

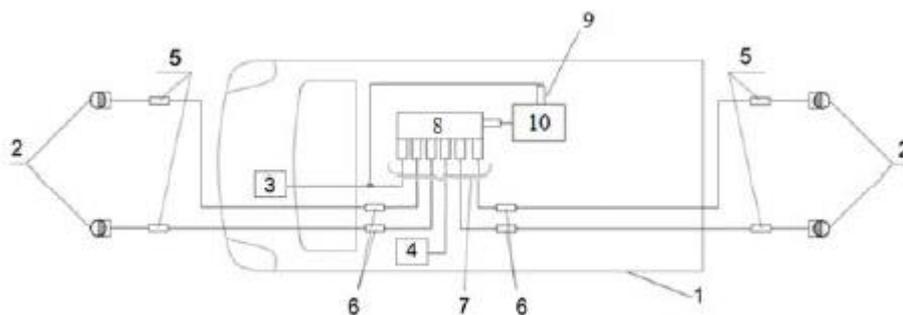


Рис. 16. Функциональная схема МСЛ (Е) 1 – автомобиль; 2 – ФМУ; 3 – GPS-приемник; 4 – датчик скорости; 5 - герметичные разъемы НУФ; 6 – разъемы XLR; 7 – разъемы для подключения к USB-хабу; 8 – USB-хаб; 9 – COM-порт; 10 – персональный компьютер.

Пределы допускаемой относительной погрешности измерений по данной методике составляют:

- $\pm 8,7 \%$ при определении средней освещенности ДП в диапазоне измерений освещенности от 0,1 до 100 лк;
- $\pm 12,5 \%$ при определении равномерности распределения освещенности в диапазоне измерений освещенности от 0,1 до 100 лк.

В МСЛ-Софт (Е) осуществляется запись, обработку и анализ данных измерений.

Для обработки результатов в программе необходимо вручную выбирать по таблице необходимый расчётный интервал, затем выбрав характерный интервал между опорами также вручную определять расположение соседних опор (рис. 17).

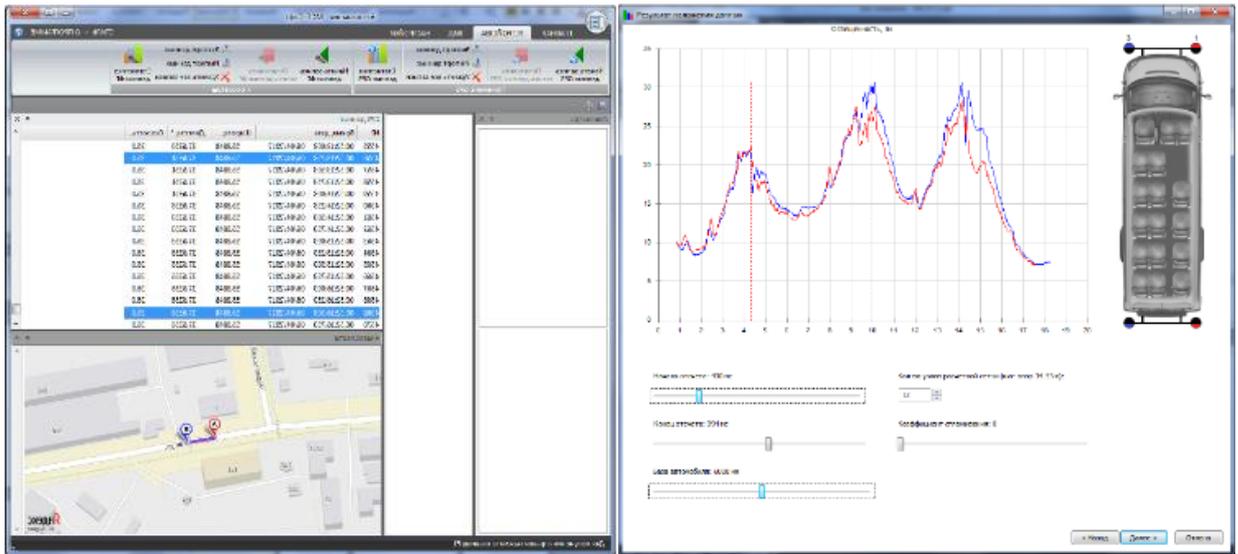


Рис. 17. Работа в программе МСЛ-Софт

В конце программа формирует отчёты о проведённых измерениях, которые представляют собой отдельные локальные файлы (рис. 18).

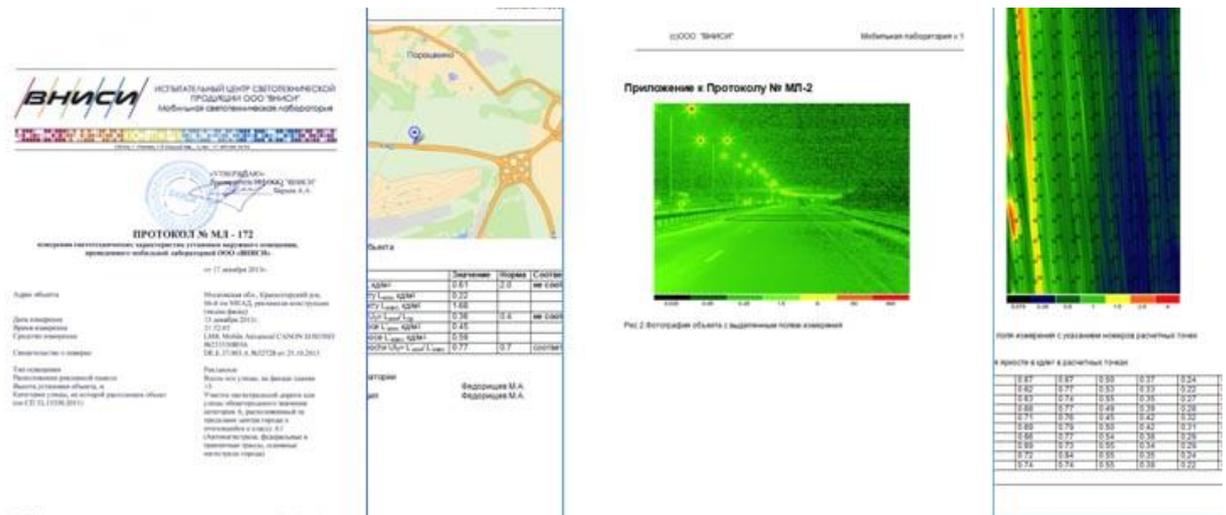


Рис. 18. Пример протокола мобильной светотехнической лаборатории ВНИСИ

В соответствии с этим программа обладает рядом недостатков:

- Выбор контрольного участка по таблице данных
- Ручное определение расположения опор
- Результаты измерений хранятся как локальные файлы в виде протоколов, что затрудняет интеграцию результатов в базу данных

1.6 Нормативная база

Учитывая, что освещённость неадекватно характеризует условия видения, нормы дорожного освещения всех развитых стран базируются на яркости. Это связано с тем, что для принятых в дорожном освещении условий наблюдения (наклон линии зрения под углом 1° к плоскости дороги) между освещённостью и яркостью нет строго линейной зависимости, так как отражение дорожного покрытия не диффузно, а носит ярко выраженный направленный характер, зависящий от направления освещения, типа и состояния отражающей поверхности.

При этом в международных и европейских нормах отсутствует различие в подходе к нормированию освещения в населённых пунктах или вне их пределов. Классификация объектов освещения в этих нормах привязана к специфике зрительной задачи на данном участке транспортного пути.

Стоит отметить что зарубежные, так и отечественные нормы учитывают специфические особенности определения понятия «яркость дорожного покрытия», и в тех случаях, когда его использование некорректно (например, на участках криволинейных в плане и (или) профиле, на участках с нестандартизированным типом покрытия и на дорогах регионов с большой продолжительностью снежного покрова), допускается нормирование по освещённости покрытия.

В большинстве концептуальных вопросах, включающих перечень нормируемых параметров и их нормативные значения, российские нормы максимально близки к зарубежным аналогам.

Однако до сих пор существует ряд ключевых различий отечественных и зарубежных норм. Это обусловлено исторически сложившимися существенными различиями между зарубежной и отечественной практикой построения нормативных документов, как по изложению, так и по представлению материала, а также географическими и климатическими особенностями России. Несмотря на это с каждым обновлением нормативной базы идёт процесс гармонизации с зарубежными нормами.

Нормирование дорожного освещения в России разделено на три направления: освещение дорог и улиц в городах и населённых пунктах, освещение автомобильных дорог общего пользования и освещение автодорожных тоннелей. На сегодняшний день первое направление регламентирует методы измерений нормируемых параметров по [26], методы расчета нормируемых параметров по [27], второе по [28] и [29], и третье по [30] и [31] соответственно.

Методы расчета нормируемых параметров

Для участков улиц, дорог и площадей со стандартной геометрией и асфальтобетонным покрытием нормируют среднюю яркость дорожного покрытия L , общую U_0 и продольную U_l равномерности яркости и пороговое приращение яркости Tl .

Однако в случае автомобильных дорог общего пользования также следует обеспечить выполнение нормируемых параметров освещенности: средней освещенности на дорожном покрытии E_n и равномерности освещенности U_n .

В ряде случаев применяют только параметры по освещенности, такие как средняя освещенность E_n на дорожном покрытии, ее равномерности U_n и предельного значения силы света ОП $I_{пред}$ в зоне слепимости:

- на участках с нестандартной геометрией;
- с покрытием, отличным от асфальтобетонного (брусчатка, бетонные плиты и другие материалы);
- в поселениях, расположенных в северной климатической зоне азиатской части России и севернее 66° северной широты европейской части России.

Нормы освещения проезжей части в зависимости от категории и класса объектов улично-дорожной сети для городских поселений приведены в приложении А.

Методы измерений нормируемых параметров

Все принятые на данный момент стандарты применяют при приёмосдаточных испытаниях (подтверждение соответствия нормам при сдаче нового или реконструированного объекта освещения в эксплуатацию), а также при инспекционном контроле (проверки значений отдельных светотехнических параметров действующих установок утилитарного наружного освещения во время эксплуатации).

Измерения яркости и освещенности покрытия проезжей части дорог проводят, как правило, мобильным способом.

При отсутствии мобильных средств измерения допускается применение стационарного способа измерений яркости и освещенности. Однако мобильный способ предпочтителен, поскольку позволяет не перекрывать движение транспорта на испытуемом участке дороги.

Нормируемые параметры

Все нормируемые параметры рассчитываются по [32]. Также в этом документе указываются правила нанесения сетки контрольных точек, которые актуальны как для статических, так и для мобильных методов измерения яркости и освещенности дорожного полотна.

Сетка наносится на одном интервале между двумя соседними опорами (расчётное поле). В соответствии с нормативными документами число контрольных точек в расчётном поле может достигать 30 и более лишь на одной полосе движения.

Расположение и размер расчётной сетки также зависит от транспортной характеристики дороги и типа расположения опор (ОП). Производить измерения необходимо на всех полосах дороги.

На рисунке 19 показан пример расположения точек для двухполосной дороги с односторонним движением и шахматным расположением ОП.

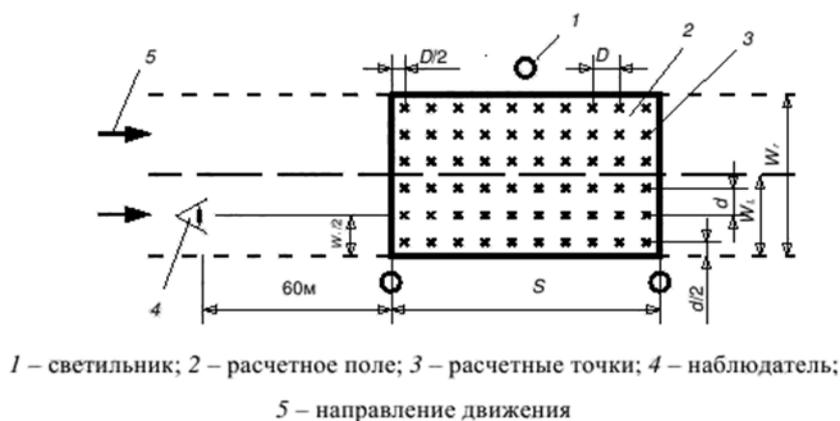


Рис. 19. Расчётная сетка измерений

В данной магистерской работе будут рассматриваться такие нормативные параметры как средняя освещенность и равномерность освещенности.

Средняя освещённость:

$$\overline{E_h} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_{h i} \quad (1)$$

Равномерность освещенности:

$$U_h = \frac{E_{h \min}}{\overline{E_h}} \quad (2)$$

Допустимая относительная погрешность измерений для средней освещённости 10% а для равномерности освещенности 20%.

Статический метод измерения освещенности

На протяжении долгого времени освещенность дорожного полотна, измерялась только статическими методами (рис. 20).



Рис. 19. Процесс измерения освещенности дорожного полотна статическим методом измерений. [33]

Суть методов заключается в проведении измерений на одном интервале между опорами с применением ручных люкметров и яркомеров в контрольных точках расчётного поля. В соответствии с нормативными документами [32] число таких точек может достигать 30 и более лишь на одной полосе движения (рис. 19).

Реализация же таких методов обладает рядом неудобств, которые лишены в мобильных методах измерения.

- Для проведения измерений на дорогах необходима остановка движения;
- от 2 до 4 часов работы;

- фиксация результатов ручным способом и соответственно долгая и рутинная обработка этих измерений.

1.7 Недостатки актуальных мобильных методов измерения и способы их совершенствования.

Современный функционал мобильных методов измерения позволяют реализовать большее количество возможностей чем-то что представлено в современной отечественной нормативной базе. В данном разделе остановимся на некоторых недостатках действующих нормативных документов, касающихся мобильных методов измерения и возможных способах их устранения.

Данный вопрос последний раз поднимался на 28 совещании МКО в 2015 году [34]. В этой работе рассматриваются возможности и пути усовершенствования мобильного метода измерения освещенности.

Необходимость измерения на всех полосах движения.

Современные нормативные документы предписывают производить измерения на всех полосах движения. И если для измерения яркости дорожного полотна часто можно обойтись одним снимком всей дороги (рис. 13), то измерения освещенности производятся на всех полосах движения. Такое положение дел иногда обязывает по несколько раз проезжать одни и те же участки дорог.

Выходом из этой ситуации может быть возможность использовать отношение яркостных характеристик разных полос движения (снятых одновременно с измерениями освещенности) для учёта разницы нормируемых параметров освещенности на разных полосах движения.

Случайность выбора расчётного интервала.

После проведенных мобильных измерений имеем подробные значения освещённости или набор яркостных изображений дороги на продолжительном участке дороги. В соответствии с действующими нормативными документами из всех данных выбирается лишь один «характерный» интервал между опорами (какой из них наиболее характерный оператор решает исходя из своих собственных представлений). Затем данные разбиваются с шагом нормируемой сетки, и расчёт производится только в этих узлах (рис 20).

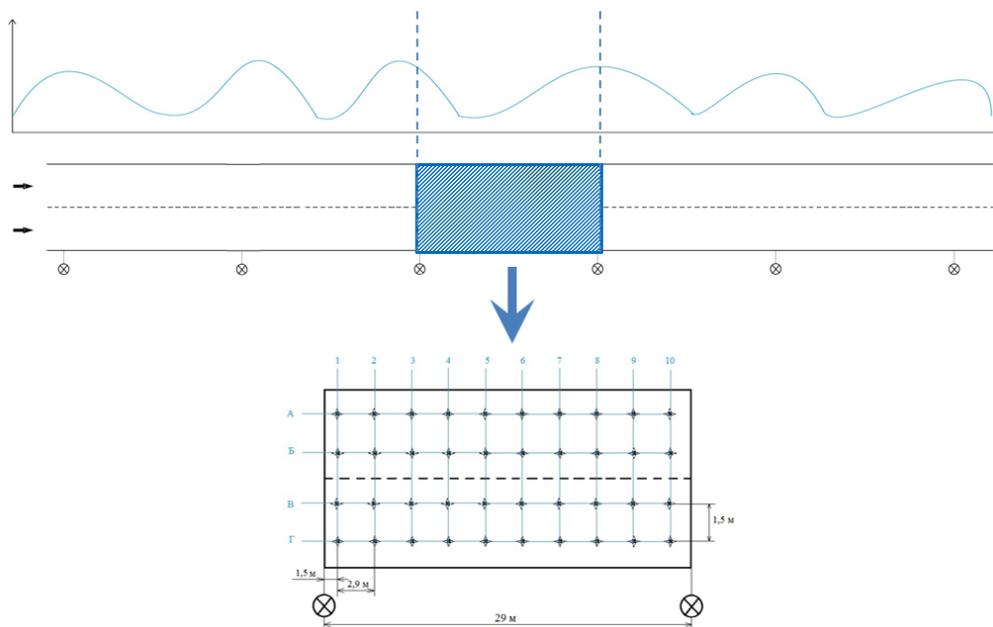


Рис. 20. Расчёт нормируемых параметров с использованием характерного участка.

Это является очень слабым местом как статических, так и мобильных методов измерения потому что, вывод о качестве освещения всей дороги делается лишь по одному участку между случайно выбранной парой соседних опор, что вносит в результат неопределенность и дополнительную погрешность. И если для статических методов такое ограничение было необходимостью, так как оно связано с трудоемкостью метода, то с помощью мобильных методов измерения появляется возможность отойти от старых канонов, включив в расчёт все интервалы со всем объёмом измерений.

На рисунке 21 видно, что на каждом шаге кривые освещенности имеют различия.

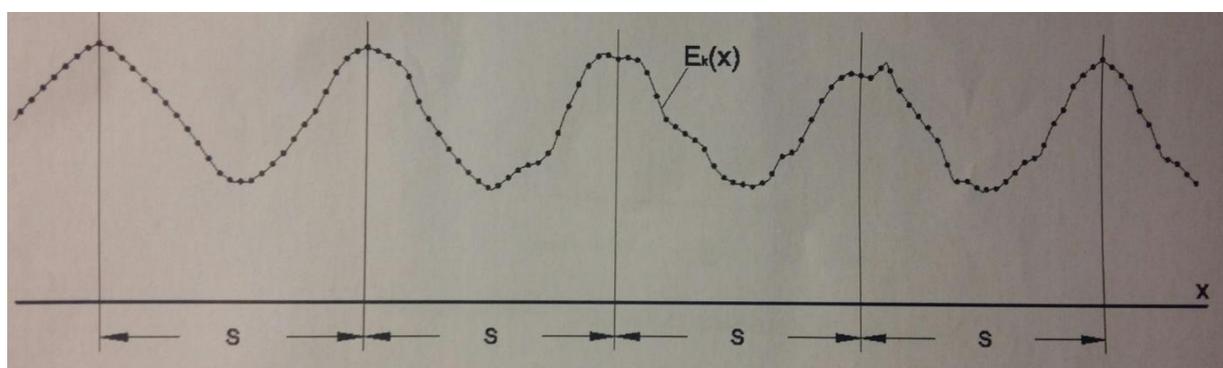


Рис. 21. Пример распределения освещенности в продольном сечении контрольного участка

На рисунке 22 для большей наглядности эти кривые (помеченные разным цветом) совмещены на одном шаге опор.

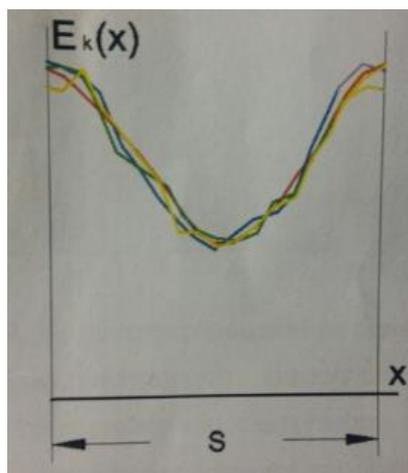


Рис. 22. Совмещенные на одном графике кривые освещенности от

Это связано со случайным отклонением реальных значений параметров осветительной установки от их номинальных значений на данном участке. К таким параметрам относятся: световой поток источников света, распределение силы света светильников, их высота установки и углы ориентации относительно оси дороги и др.

Первый вариант решения этой проблемы это, как было предложено в [35] построить усредненную кривую освещенности по всем имеющимся интервалам между опорами. В результате можно получить двухмерное распределение освещенности, усредненное по всему контрольному участку и приведенное к одному шагу светильников S , пример которого показан на рисунке 23.

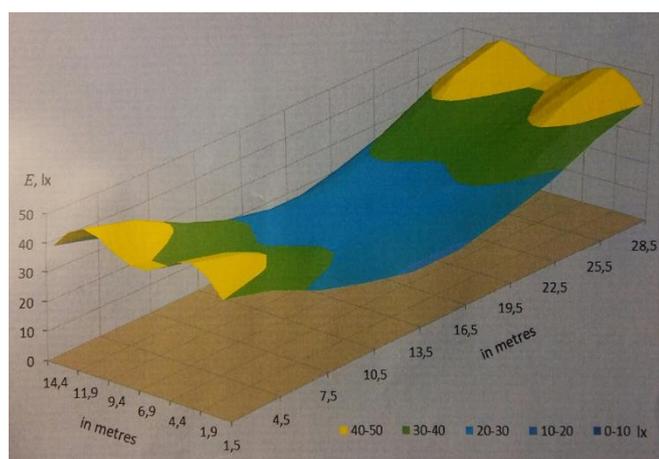


Рис. 23. Пример усредненного распределения освещенности на контрольном участке дороги, приведенного к одному шагу светильников (дорога с

четырьмя полосами движения, светильники расположены симметрично по обеим сторонам дороги).

Второй вариант заключается в том, что для каждого интервала рассчитываются нормируемые параметры и определяется где выполняются нормы, а где нет (рис. 24).

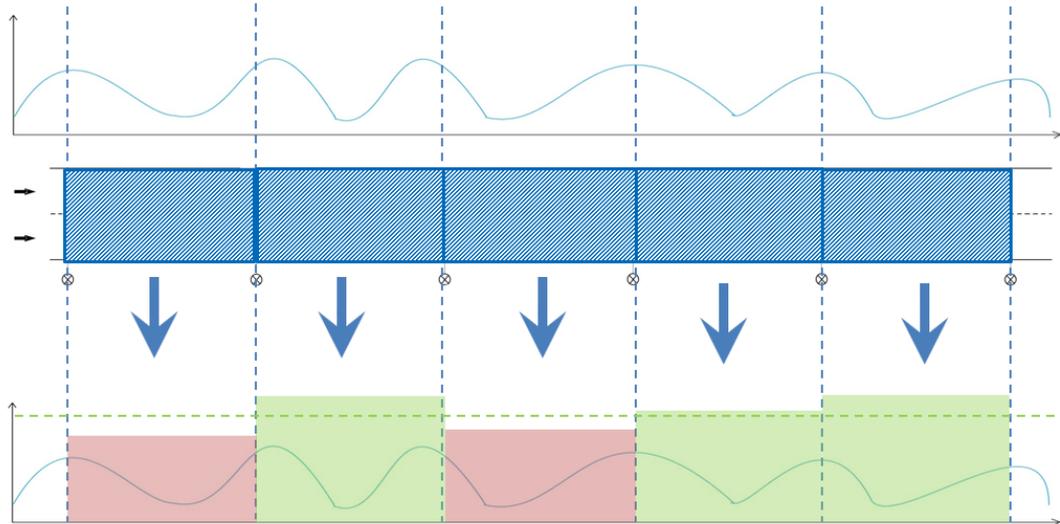


Рис. 24. Расчёт нормируемых параметров с использованием всех интервалов между опорами.

Такой подход обладает большей информативностью так как позволяет оценить каждый интервал дороги по отдельности и дополнительно выявить слабые места, которые требуют особого внимания.

Расчётная сетка

Что касается сетки контрольных точек в продольном направлении, то учитывая, что современные люксметры позволяют проводить измерения с частотой порядка 100 отсчётов в секунду и более, следует существенно уменьшить продольный шаг контрольных точек или вообще использовать все имеющиеся данные. Это позволит повысить точность конечных результатов, особенно при выявлении значения минимальной освещённости $E_{\text{мин}}$ (рис. 25), от которого в большей степени зависит значение равномерности освещенности U_h .

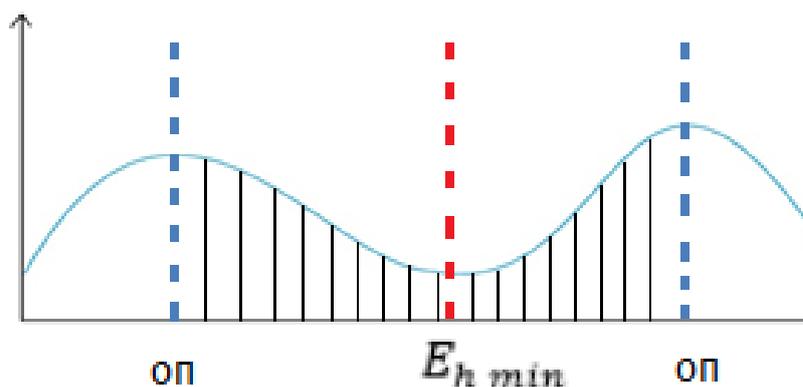


Рис. 25. Дискретизация данных в соответствии с продольным шагом расчётной сеткой (чёрные линии) и абсолютный минимум на интервале между опорами (красная линия).

Равномерность освещенности - точечная характеристика

Ещё один из существенных недостатков заключается в том, что измерения равномерности освещенности обладает достаточно большой погрешностью, потому что в отличие от средней освещенности является точечной характеристикой и зависит от абсолютного минимума освещенности (2).

Выходом из этой ситуации может быть использование для характеристики равномерности интегральную статистическую величину.

1.8 Мониторинг

Исходя из этих недостатков и современных трендов измерения качества освещения дорожно-транспортной сети в настоящее время ВНИСИ разрабатывается ГОСТ Р... Освещение наружное. Мониторинг нормируемых параметров мобильным способом.

Этот стандарт будет регламентировать метод мониторинга осветительных установок утилитарного освещения, который будет применяться при контроле действующих осветительных установок на соответствие нормируемым параметрам освещения, а именно средняя освещённость и равномерность освещённости, определяемые не на одном участке между опорами, а на всей протяжённости измерений.

Также стандарт предписывает, что измерения возможно производить не на всех полосах движения если имеется возможность воспользоваться фотояркометром также установленным на автомобиль и произвести одновременно с измерением освещенности на одной полосе измерения яркости на всех полосах движения.

С целью перехода от измеряемой величины освещенности на контрольной полосе к нормируемой величине освещенности на всей проезжей части одновременно с измерениями освещенности проводят измерения яркости дорожного покрытия на выбранном участке трассы.

По результатам обработки для каждого интервала между ОП определяют значения следующих величин:

$\overline{E}_{\text{кп}}$ и $E_{\text{кп,мин}}$ - средней и минимальной освещенностей на дорожном покрытии контрольной полосы соответственно;

$\overline{L}_{\text{кп}}$ и $L_{\text{кп,мин}}$ - средней и минимальной яркостей дорожного покрытия контрольной полосы соответственно;

\overline{L} и $L_{\text{мин}}$ - средней и минимальной яркостей дорожного покрытия всей проезжей части соответственно.

По полученным данным для каждого интервала между ОП определяют фактические значения средней освещенности $\overline{E}_{\text{ф}}$ и равномерности освещенности $\overline{U}_{\text{ф}}$ и, на всей проезжей части по следующим формулам:

$$\overline{E}_{\text{ф}} = \overline{E}_{\text{кп}} \frac{\overline{L}}{\overline{L}_{\text{кп}}} \quad (3)$$

$$\overline{U}_{\text{ф}} = \frac{E_{\text{кп,мин}}}{\overline{E}_{\text{кп}}} \frac{\overline{L}_{\text{кп}}}{\overline{L}} \frac{L_{\text{мин}}}{L_{\text{кп,мин}}}. \quad (4)$$

На рисунке 26 показан пример расположения участков проезжей части, для которых определяют значения величин, входящих в формулы (3) и (4).

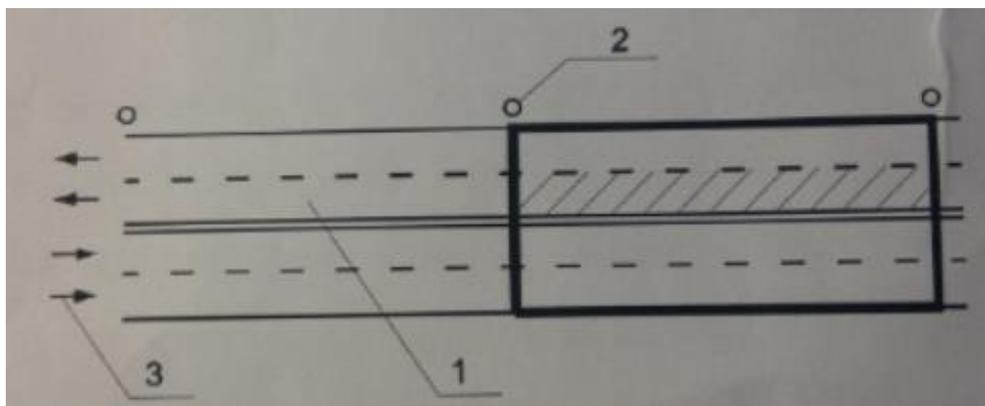


Рис. 26 - Пример определения величин, входящих в формулы (3) и (4), для участка четырехполосной дороги с двусторонним движением транспорта. 1 - контрольная полоса. 2 - ОП, 3 - направление движения транспорта. Жирным

прямоугольником выделено поле для определения величин \bar{L} и $L_{\text{мин}}$, штриховкой выделено поле для определения величин $\overline{E_{\text{кп}}}$, $E_{\text{кп,мин}}$, $\overline{L_{\text{кп}}}$ и $L_{\text{кп,мин}}$.

Выбор контрольной полосы в зависимости от расположения ОП и количества полос движения может быть разным в зависимости от схемы расположения ОП и геометрии дороги.

1.9 Программно-измерительный комплекс ВНИСИ

На данный момент ООО ВНИСИ совместно с БЛ ГРУПП ведётся разработка программно-измерительного комплекса, позволяющего реализовать технологию мониторинга дорожного освещения, включающую:

- сбор и хранение исходной информации по результатам измерений;
- обработку собранной информации;
- передачу данных в базу данных (БД);
- нанесение результатов измерения параметров дорожного освещения на карту данной территории (картирование);
- получение протокола мониторинга;
- получение статистической информации (аналитика).
- паспортизация дорог

В соответствии с предполагаемым функционалом была создана структурная схемы программно-измерительного комплекса, а разработка разбита на соответствующие этапы (рис. 27).

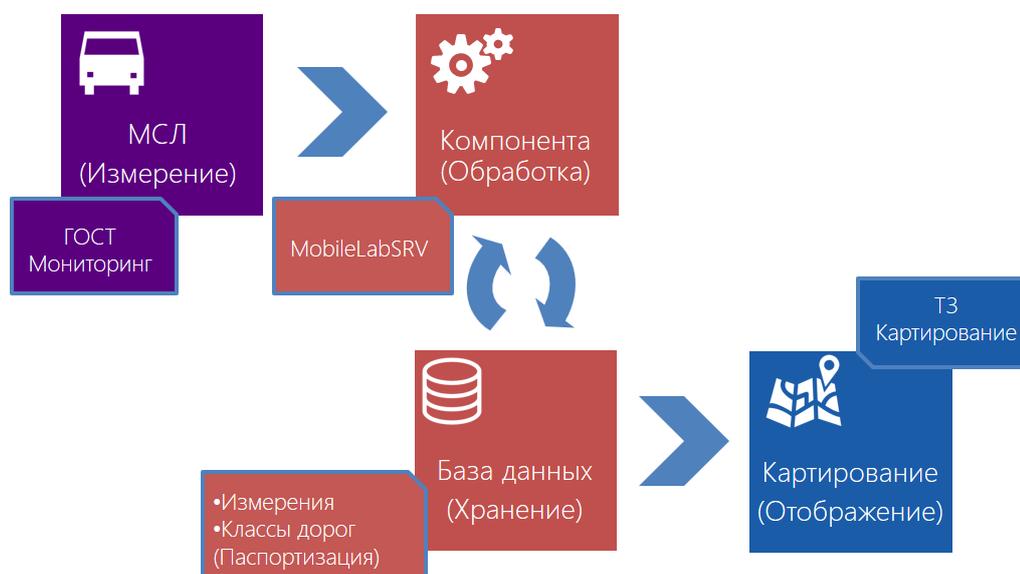


Рис. 27. Структурная схема Программно-измерительного комплекса ВНИСИ.

На базе мобильной светотехнической лаборатории ВНИСИ отработана методология измерения распределения освещенности на дороге мобильным способом.

После проведения измерений данные по освещенности загружаются в базу данных. Каждая запись представляет собой Протокол измерения и привязывается к конкретному объекту освещения (улице).

База данных должна быть связана с Компонентой обработки измерений, в которой бы проводилась обработка сырых данных измерений МСЛ.

Далее из базы данных производится выгрузка протоколов измерения на специализированный портал, на котором кроме всего будет реализовано отображение данных в виде картирования.

В связи с чем потребовалось произвести работу для каждого элемента комплекса, а именно

- Разработка и принятие норм по мониторингу дорожного освещения
- Разработка базы данных для хранения как результатов измерений, так и классов дорог, что позволило бы реализовать паспортизацию дорог.
- Разработка компоненты обработки результатов измерения для последующей выгрузки в базу данных
- Разработка портала с возможностью отображения информации, хранящейся в базе данных в виде картирования

Разработка компоненты обработки данных измерений по методу мониторинг дорожного освещения для этого комплекса это и есть практическая составляющая настоящей магистерской работы.

Компонента обработки измерений.

Вся расчётная часть сосредоточена в компоненте обработки измерений.

Её функции:

1. Загрузка данных из МСЛ-софт

2. Первичная обработка

- Отбраковка данных
- Выбор участка

- Отображение всех адекватных входных данных
 - Отображение выбранного участка на карте
3. Вторичная обработка
- Поиск и редактирование максимумов (опор)
 - Сложение данных с передних и задних датчиков
 - Поиск минимума
 - Сглаживание
4. Финальная обработка
- Усреднение данных левых и правых датчиков
 - Дискретизация значений для отображения на карте
 - Корректировка GPS данных на карте.
 - Расчёт массива данных для картирования
 - Расчёт нормируемых показателей
5. Отображение результатов расчёта.
- Отображение графика освещённости, равномерности освещённости, средней освещённости.
 - Отображение карты с полученными результатами.
6. Формирование отчёта
- создание протокола мониторинга
 - создание статистической информации
7. Сохранение и восстановление данных
- Реализация сохранения данных в 1С.
 - Реализация восстановления данных из 1С.

Портал отображения данных

На карте, в зависимости от прав доступа и выбранного пользователем слоя, отображается различный набор протоколов измерения.

Данные этих протоколов отображаются на карте в виде слоёв информации (рис 28):

- Категории улиц
- Гистограммы освещенности
- выполнение норм (непосредственно указывается с помощью цвета, выполняются нормы на конкретном участке дороги или нет)

- дополнительная информация (графики, статистика, видео измерений)

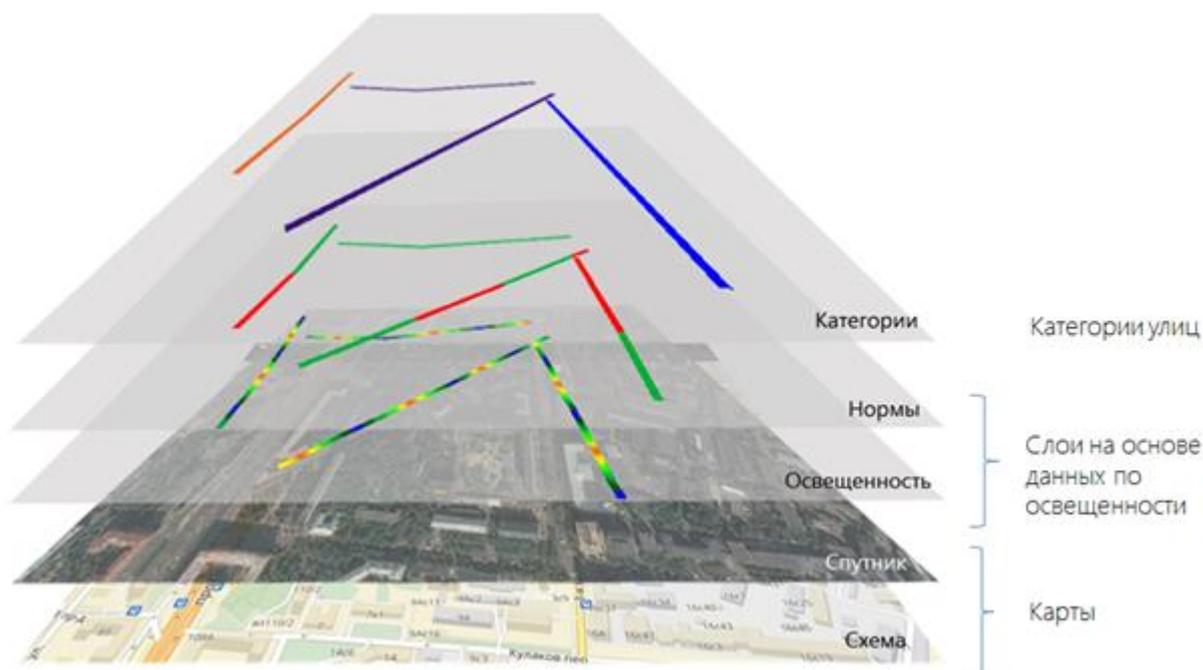


Рис. 28. Картирование. Слои информации.

Предполагается использовать данную разработку для предоставления услуг различным ведомствам для более слаженной и эффективной работы таким как:

- Городские службы, отвечающие за контроль качества освещения дорожно-уличной сети;
- Федеральные и региональные управления автомобильных дорог, входящие в структуру Федерального дорожного агентства;
- Энергосервисные компании, реализующие проекты по реконструкции и обслуживанию дорожного освещения.

1.10 Вывод

Таким образом, можно сделать общий вывод о том, что в современном мире дорожно-транспортная инфраструктура растёт небывалыми темпами, а безопасность на дорогах, особенно в России, является колоссально важной и актуальной проблемой. Особую опасность представляет вождение в темное время суток. Одним из основных направлений по увеличению безопасности для водителей в темное время суток является улучшение освещения на дорогах. Однозначной зависимости уменьшения дорожно-транспортных рисков от уровней освещенности нет, однако очень важным оказывается наличие определённого качества и количества освещения, что накладывает

дополнительные обязательства, как на современную нормативную светотехническую базу, так и на способы измерения нормативных параметров.

В связи с вышеперечисленным потребность в качественном и быстром анализе дорожного освещения растёт. Выходом из данной ситуации стало появление мобильных способов измерения. С развитием информационных технологий и качества измерительного оборудования стало возможным с помощью мобильных методов измерения быстро и удобно производить анализ большого количества объектов, производить мониторинг состояния инфраструктуры для целых городов. В некоторых странах создаются масштабные базы данных результатов мониторинга с частным и общим доступом к информации в виде картирования. Такие базы данных могут объединять в себе результаты нескольких типов измерений для определенного объекта инфраструктуры, что позволяет проводить анализ и оценку того или иного решения, касающегося вопросов реконструкции и модернизации объектов инфраструктуры. Разработанная ВНИСИ мобильная светотехническая лаборатория отвечает всем современным требованиям, возможностями, и тенденциям в сфере мобильных измерений. Однако её возможности используются не полностью. Это связано как с несовершенством Российской нормативной базы, так и программно-нереализованными возможностями МСЛ.

В России с каждым обновлением нормативной базы идёт процесс гармонизации с зарубежными нормами, где как уже было сказано выше основные показатели нормирования, базируются на ЯДП в заданной точке. Однако в ряде случаев пользуются именно освещенностью и её не стоит сбрасывать со счетов. С учётом нашего климата и качества инфраструктуры измерения именно освещенности до сих пор остаются и ещё долго будут оставаться знаковыми в отечественной измерительной практике. На данный момент измерения яркости сталкивается с рядом практических трудностей и не является достаточно автоматизированным процессом.

Последнее связано с тем, что обработка яркостных изображений требует достаточно много времени, что приводит к вынужденному ограничению использования яркости при полноценном мониторинге большого количества объектов, а также при неблагоприятных погодных условиях.

Однако измерения освещенности также не лишены недостатков, многие из этих недостатков с появлением мобильных способов измерения появилась возможность исключить, анализ этих новых возможностей будет составлять исследовательскую часть моей магистерской работы.

Тем не менее на данный момент есть возможность продвинуться дальше в усовершенствовании метрологической практики. Высокоорганизованный мониторинг дорожно-транспортной сети позволил бы более продуманно и системно подойти к вопросу контроля качества дорожного освещения.

Исходя из этих размышлений руководством ВНИСИ было принято решение о создании программно-измерительного комплекса по мониторингу освещения дорожно-транспортной сети. В рамках этого проекта был разработан новый нормативный документ, посвященный мобильному мониторингу освещения, разработана база данных и началась разработка портала по отображению результатов измерений в виде Картирования. Практическая часть моей магистерской работы заключается в написании программы по обработке данных измерений мобильной светотехнической лаборатории по методу мониторинг дорожного освещения и подготовка данных для нанесения на карту.

1.11 Цели и задачи

Таким образом в задачи моего диплома входит:

1. Практическая часть. Разработка программы по обработке результатов измерения освещенности с помощью мобильной светотехнической лаборатории по методу мониторинг дорожного освещения.
 - Загрузка входных данных измерений МСЛ
 - Обработка данных и расчёт нормативных параметров освещения
 - Корректировка GPS координат для последующего нанесения результатов на карту.
2. Исследовательская часть. Реализация и анализ различных способов расчёта нормируемых параметров освещения с использованием реальных данных измерений.
 - Оценка погрешности результатов повторных измерений
 - Влияние случайности выбранного интервала измерений
 - Оценка усреднения результата среди всех интервалов между опорами
 - Оценка влияния уменьшения шага расчётной сетки
 - Оценка влияния расчёта равномерности освещённости как точечной величины
 - Влияние сглаживания данных

2 Теоретическая часть

2.1 Исходные данные

Исходные данные для обработки представляют собой:

- Значения освещённости с 4 ФМУ,
- GPS координаты
- Скорость автомобиля.

Входные данные представляют собой значения освещённости с четырёх ФГ, GPS координаты автомобиля и его скорость. Каждый из этих параметров записывается компьютером и привязывается к общему времени.

Определение корректного участка измерений

Запись данных осуществляется по 5 независимым потокам, привязанным к общему времени компьютера (Рис. 29). Четыре потока на каждый ФМУ, с частотой записи 100 Гц. И отдельный поток для датчика GPS и скорости с частотой записи 10 Гц.

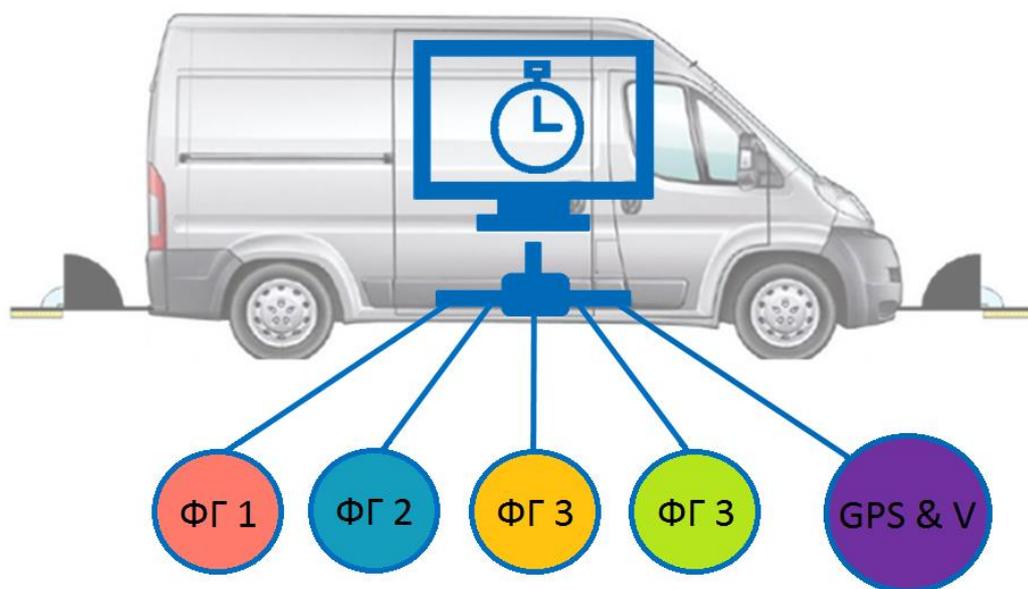


Рис. 29. Исходные данные

Таким образом, на первом этапе, необходимо привести все данные к одной временной оси и разбить на временные участки, на которых присутствуют данные со всех датчиков (Рис. 30).

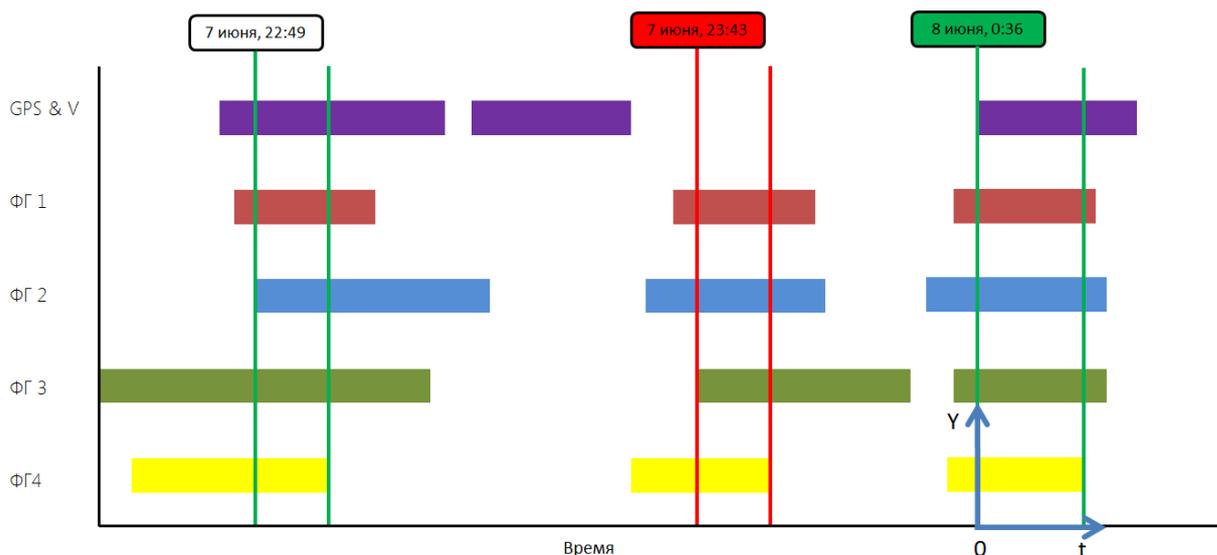


Рис. 30. Поток данных.

Временные отрезки разбиваются если время, когда датчики были отключены между двумя соседними измерениями больше 5 минут.

Так как количество таких участков может быть больше одного, то далее необходимо выбрать один и сместить ось координат на начало выбранного участка.

Освещённость

Как уже было сказано ранее, МСЛ (Е) ВНИСИ, представляет собой реализацию мобильного метода измерения освещенности, с помощью «разнесенных в плоскости измерения приемников», установленных на автомобиль (Рис. 31).

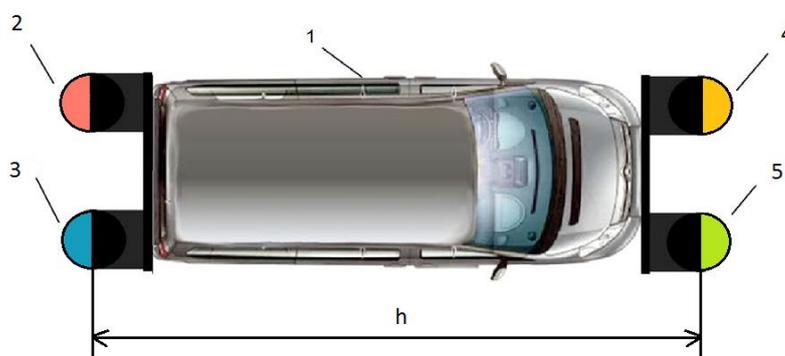


Рис. 31. Схема расположения ФМУ на автомобиле. 1 – автомобиль; 2,3 – задние ФМУ; 4,5– передние ФМУ; h –расстояние между попарными ФМУ.

Конструкция ФМУ (Рис. 32) представляет собой фотодатчик, закрытый сверху специальным колпаком, зачернённым с одной стороны, что позволяет ФМУ производить измерения половины от полусферической освещённости.

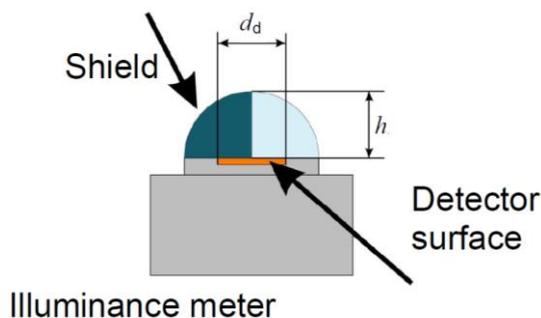


Рис. 32. Конструкция ФМУ.

Поэтому исходные данные освещённости будут выглядеть как на рисунке 33.

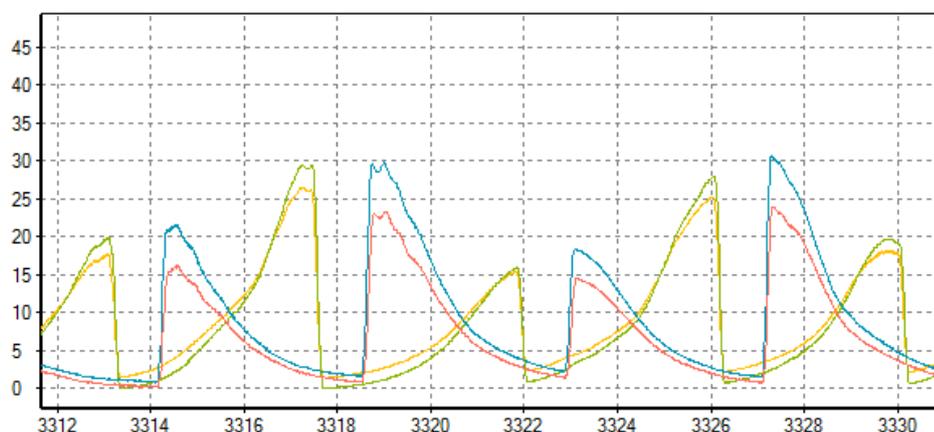


Рис. 33. Измеренные значения освещённости (лк) от времени (с).

На рисунке жёлтые и зелёные кривые - это значения освещённости, полученные с помощью передних левых (4) и правых (5) датчиков ФМУ, а красные и синие с помощью задних левых (2) и правых (3) соответственно.

Скорость

Исходные значения скорости представлены на рисунке 34.

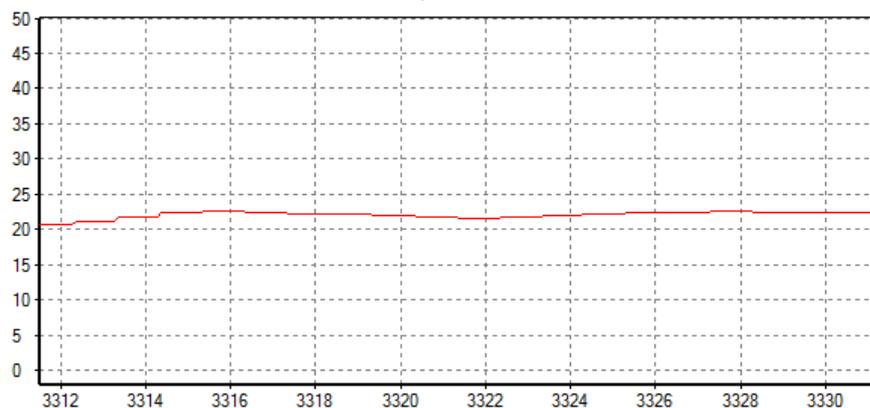


Рис. 34. Измеренные значения скорости (км/ч) от времени (с).

Данные скорости нужны для того, чтобы можно было перейти от оси по времени к оси по расстоянию, так как это важно для дальнейших расчётов. Переход осуществляется с учётом того, что между шагом измерений ($\Delta t = t_i - t_{i-1} \approx 0.1\text{с}$) скорость автомобиля не успевает значительно измениться ($V(t_{i-1}) \approx V(t_i)$):

$$S_i = S_{i-1} + V(t_{i-1}) * \Delta t \quad (5)$$

GPS координаты

Пример маршрута проведенных измерений представлен на рисунке 35.

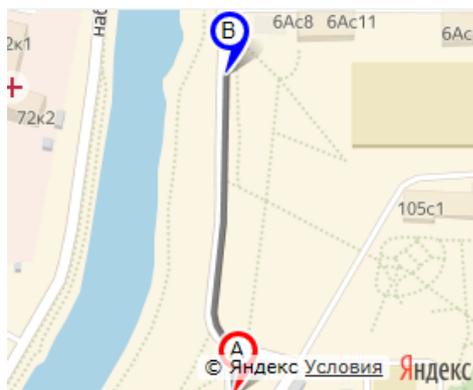


Рис. 35. Маршрут измерений

Полученные координаты маршрута измерений не могут в точности соответствовать реальным координатам дороги, указанным на карте, так как GPS датчики обладают погрешностью вплоть до 10 м. В дальнейшем потребуется наносить результаты измерений на карту, поэтому необходимо решить вопрос о корректировке GPS координат. Корректировка представляет собой задачу нахождения пересечения луча и точки по нормали (Рис. 36).

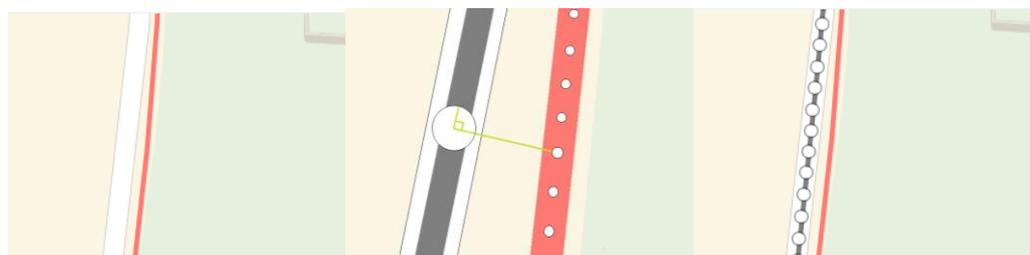


Рис. 36. Корректировка маршрута

Неравномерное распределение точек на непрямолинейных участках дополнительно интерполируется (рис. 37).

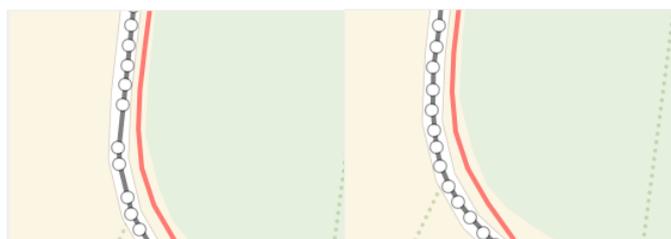


Рис. 37. Интерполяция маршрута.

Так как GPS датчик снимает данные с достаточно большой частотой (10 раз в секунду), то для дальнейшего их отображения на интернет портале, необходимо уменьшить количество точек, чтобы не перегружать трафик.

Шаг разбиения выбирается из тех соображений, чтобы он был достаточно мал, для того чтобы описывать криволинейные маршруты.

2.2 Определение расположения опор

Расчёт нормируемых параметров происходит на интервалах между двумя соседними опорами. Поэтому необходимо определить расположения опор по данным освещённости. В программе расположения опор определяется автоматически по фронтам графиков освещённости с правых передних и задних датчиков. Так как в результате опыта выяснилось, что значения с правых датчиков обладают наиболее резким фронтом.

Нахождение расположения фронтов представляет собой алгоритм перебора значений с поиском всех парных экстремумов минимума и максимума на участке и последующего выделения тех пар, разница между значениями освещённости которых, больше заданного числа d (Рис. 38). [36]

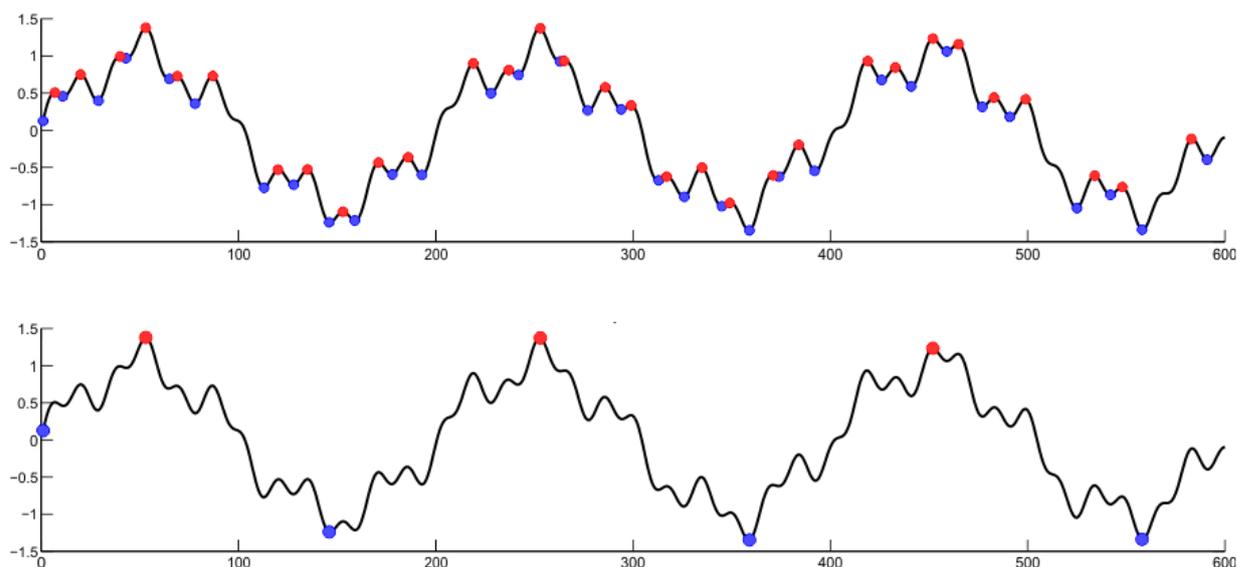


Рис. 38. Поиск экстремумов функции. Верхний график – все экстремумы, экстремумы при $d = 0.5$;

После нахождения положения фронтов для передних и задних датчиков, происходит их сравнение. Очевидно, что смысл имеет только пара найденных фронтов, расстояние между которым примерно равно h (расстояние между парными ФМУ). Допуская неточности определения скорости, дополнительно вводится поправочный коэффициент k_{Π} ($k_{\Pi} < 1$). Таким образом, отсеиваются все пары опор, которые не удовлетворяют условию:

$$(1 - k_{\Pi}) * h < S_F - S_B < (1 + k_{\Pi}) * h \quad (6)$$

В итоге получаем корректное расположение опор, найденное с заданной чувствительностью (рис. 39).

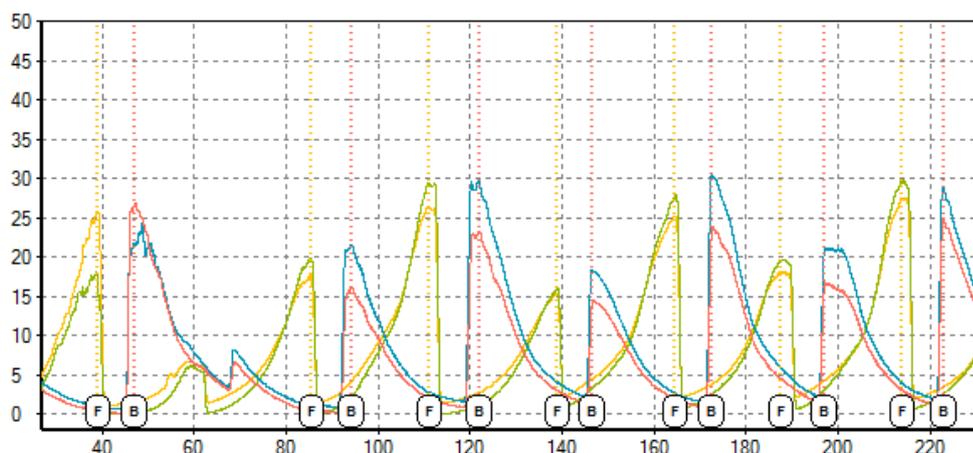


Рис. 39. Интерполяция маршрута.

2.3 Сведение данных с передних и задних датчиков.

Значения освещённости на каждом участке времени получаются путем попарного сложения значений освещенности с передних и задних датчиков, отдельно для левой (2,4) и правой (3,5) пары ФМУ, с учётом их смещения на расстояние h (Рис. 40).

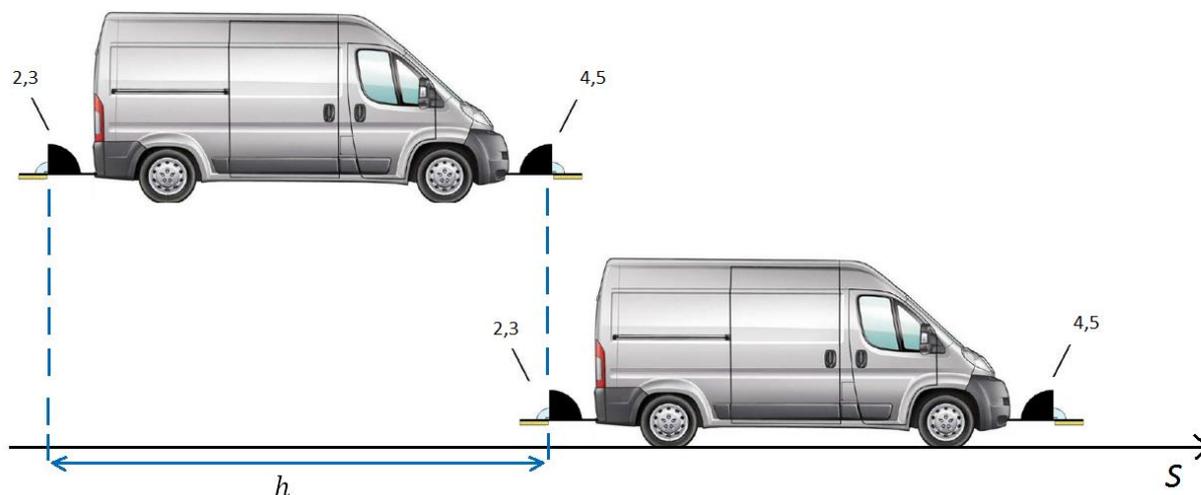


Рис. 40. Интерполяция маршрута.

Идеально резкие обрывы (фронты) кривых освещённости при сумме дают гладкую кривую (Рис. 41).

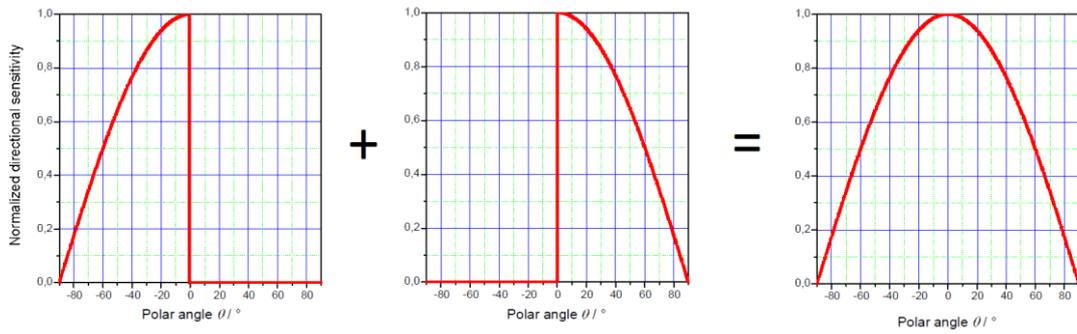


Рис. 41. Сложение формы сигналов с передних и задних датчиков освещённости.

Однако реальные фронты кривых обладают крутизной, которая зависит от конструктивных характеристик ФМУ, таких как диаметр приёмной поверхности (d_d), расстояние от приёмной поверхности до колпака (h) и др. (Рис. 42).

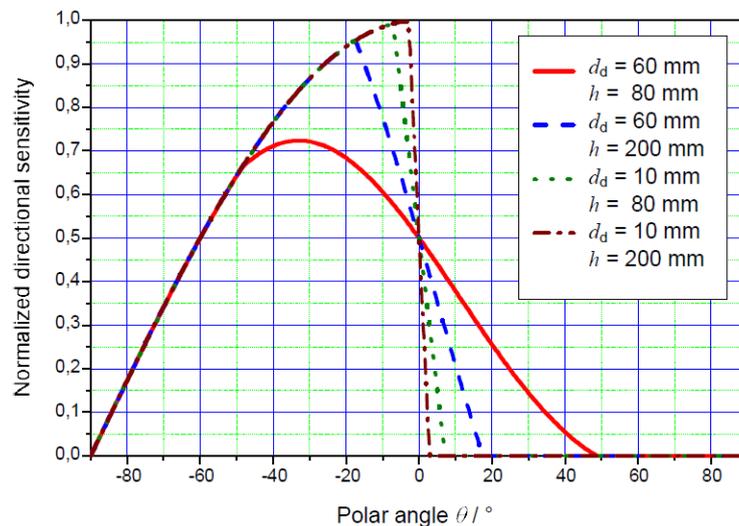


Рис. 42. Крутизна фронта в зависимости от конструктивных характеристик ФМУ.

Таким образом, реальные измерения имеют вид, представленный на рисунке 43:

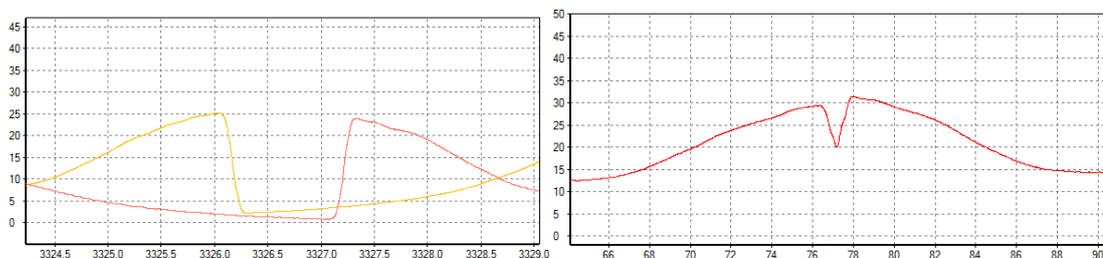


Рис. 43. Значения с левых передних и задних датчиков до сведения и после сведения без сглаживания провала.

В программе, образующийся провал после сложения, сглаживается путем простого соединения линией двух экстремальных значений между провалами (Рис. 44).

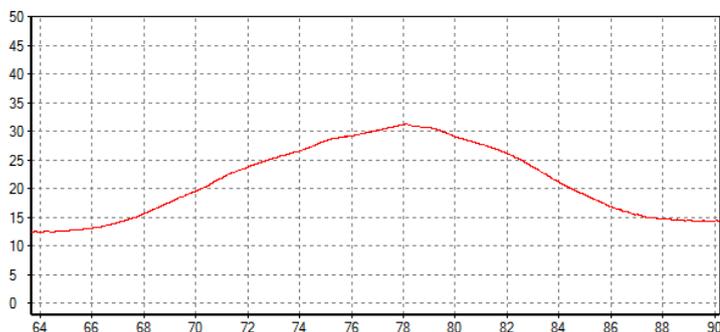


Рис. 44. Суммарные значения с левых передних и задних датчиков после сведения с линейным сглаживанием провала.

2.4 Расчёт нормируемых параметров

Обработка данных измерений представляет собой определение таких нормируемых параметров, как средняя освещённость:

$$\overline{E_h} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_{h i} \quad (7)$$

, где n – количество контрольных точек, $E_{h i}$ – освещённость на i -ой контрольной точке.

и равномерность освещённости:

$$U_h = \frac{E_{h \min}}{\overline{E_h}} \quad (8)$$

, где $E_{h \min}$ – абсолютный минимум освещённости между контрольными точками на расчётном интервале;

Расчётная сетка

Контрольные точки определяются по расчётной сетке, указанной в ГОСТ Р 55708-2013, но с некоторыми корректировками для мобильных методов. В частности, продольное количество рядов уменьшается до двух, а их расстояние друг от друга зависит от конструкции расположения ФМУ. Схема расчётной сетки указана на рисунке 3.

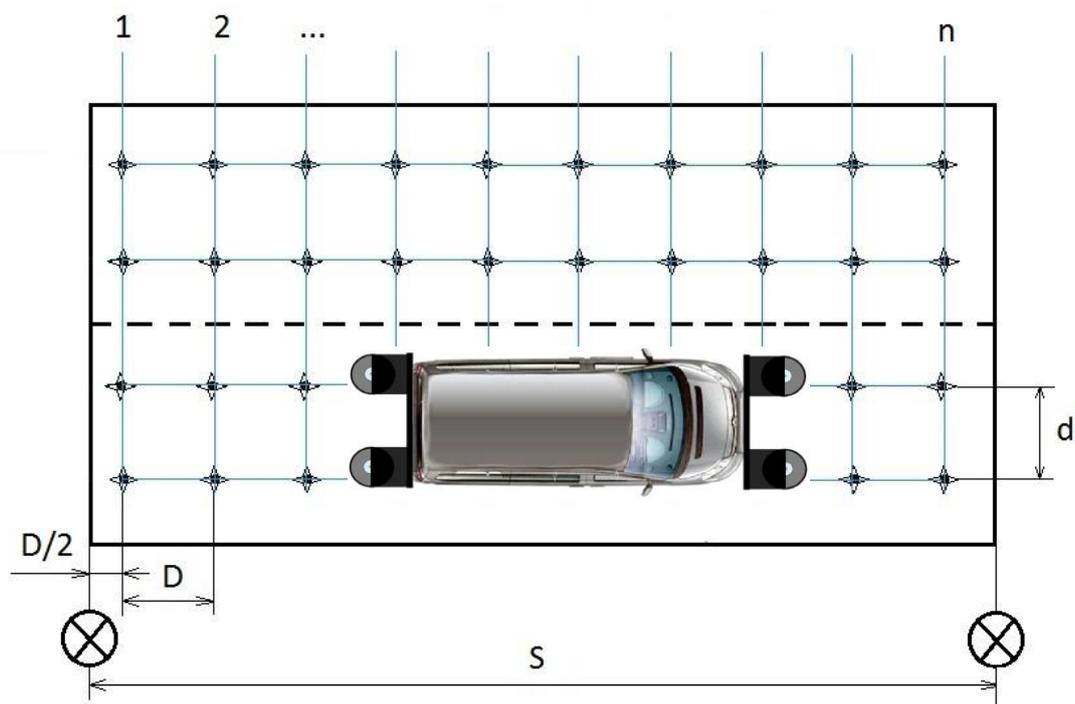


Рис. 45. Суммарные значения с левых передних и задних датчиков после сведения с линейным сглаживанием провала.

Где n – количество контрольных точек, d – конструктивное расстояние между ФМУ, D – расчётное продольное расстояние между двумя соседними точками, S – расстояние между двумя соседними опорами.

В продольном направлении число точек n равно: 10, если $S \leq 30$ м

Такому наименьшему числу, при котором $S/n \leq 3$ м, если $S > 30$ м.

Точки располагаются равномерно с шагом $D=S/n$, первая точка отстоит от границы расчётного поля на расстоянии $D/2$.

В практическом смысле расчётная сетка определяет шаг, с которым будут взяты точки для расчёта нормируемых параметров.

3 Практическая часть

3.1 Паспортизация дорог.

Чтобы определить классы по освещению необходимо открыть окно, в котором нужно с помощью мыши указать участок дороги с соответствующим классом дороги на нём (рис. 46).

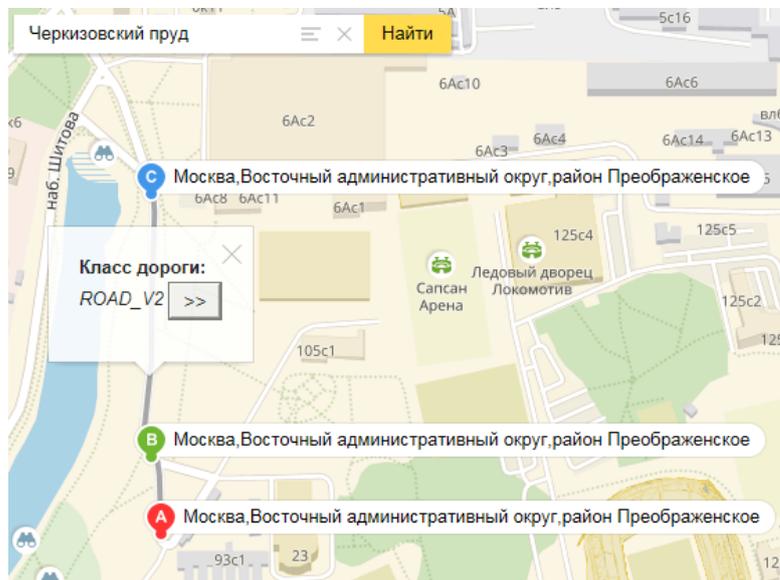


Рис. 46. Окно определения классов дорог.

С помощью строки поиска, находится необходимое расположение участка измерений. С помощью мыши задаётся участок измерений в виде маршрута с узловыми точками (A,B,C,D...) и класс дороги на этом участке. Для каждой точки высвечивается её адрес.

3.2 Обработка

Входные данные

На первом этапе после импорта файлов измерений МСЛ программа отображает все входные данные.

На графике «Освещённость» изображены кривые освещённости от 4 датчиков. Цвета кривых соответствуют картинке МСЛ(Е) изображенной в правом верхнем углу программы). На графике «Скорость» и «GPS координаты» отобразятся входные данные измерений. Данные скорости также, как и освещённости разбиты на временные интервалы. Если входные данные соответствуют друг другу, то после некоторого времени, потраченного на обработку, программа определит парные, совместимые по времени интервалы измерений, которые можно использовать для дальнейшего расчёта (рис. 47).

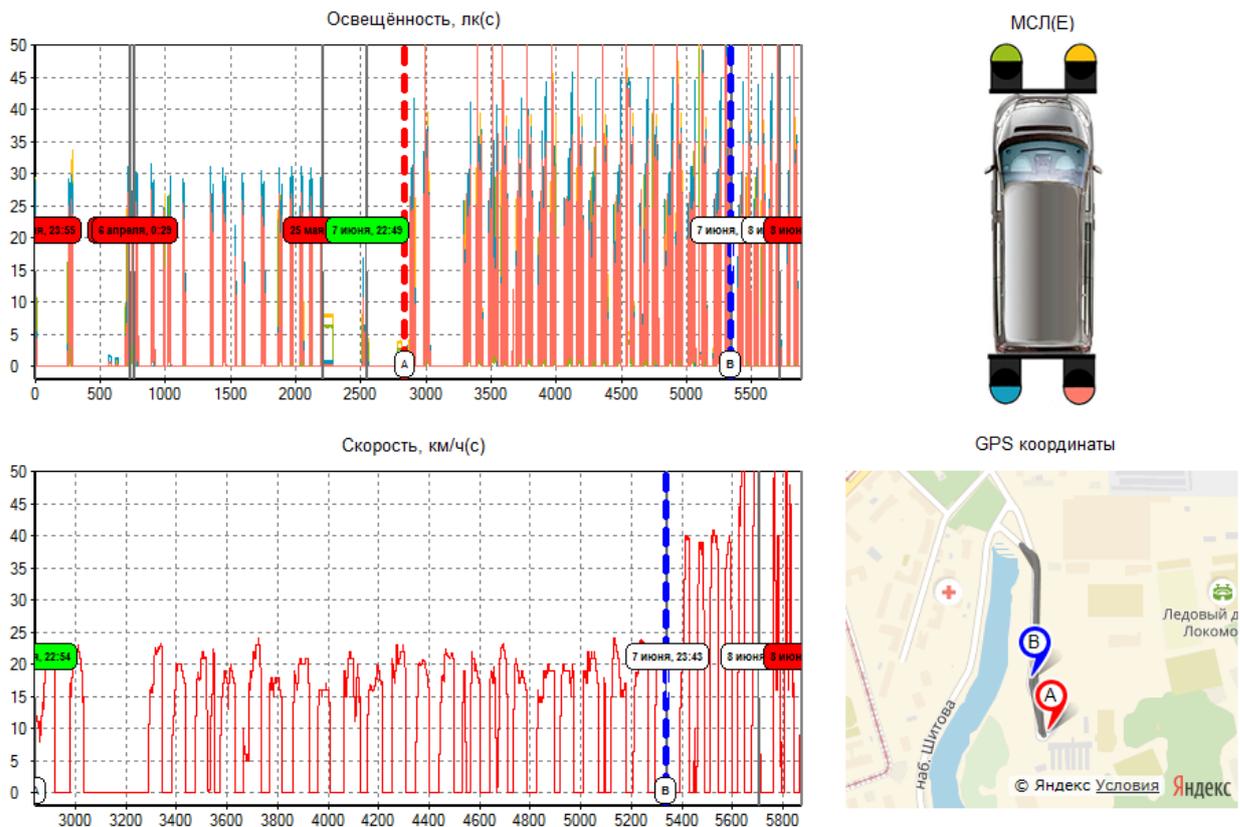


Рис. 47. Совместно обработанные входные данные

Красные маркеры означают что данный интервал измерений нельзя выбрать для дальнейшего расчёта так как для него нет совместимой пары. Белые – это корректные интервалы. Зелёные это выбранная пара интервалов. Из всех парных интервалов программа автоматический выбирает самый длительный. Можно выбрать другой временной интервал, щёлкнув по одному из белых маркеров левой кнопкой мыши.

Также Графики можно масштабировать и панорамировать с помощью кнопок мыши (рис. 48).

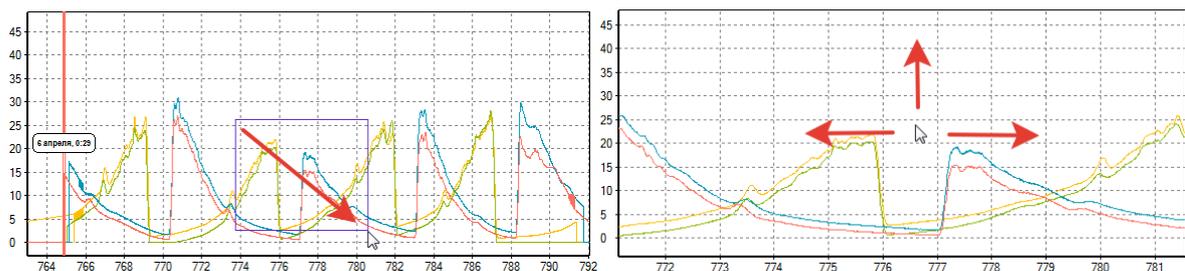


Рис. 48. Масштабирование и панорамирование графиков с помощью мыши

Далее перемещая мышкой маркеры «А» и «В» выбирается рабочий участок (рис.49).

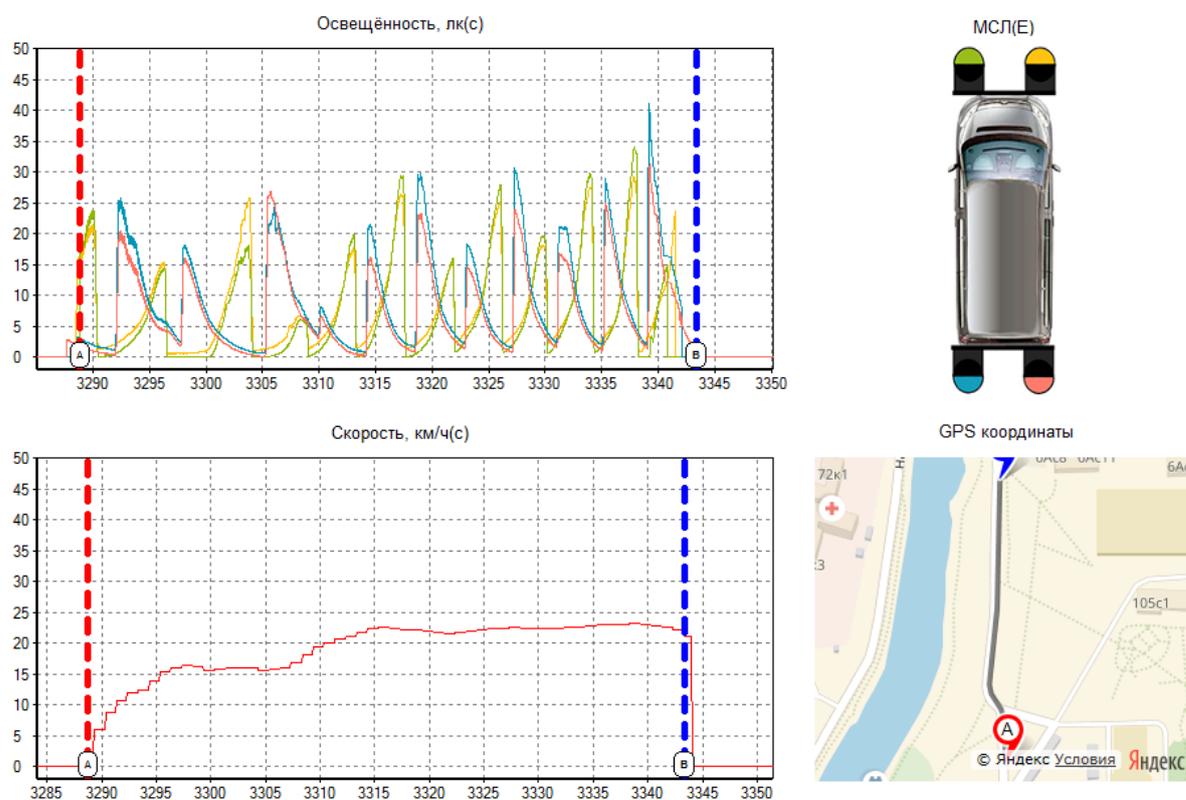


Рис. 49. Выбор расчётного участка»

Поиск опор

Далее на выбранном участке программа автоматически определяет расположение опор (рис. 50).

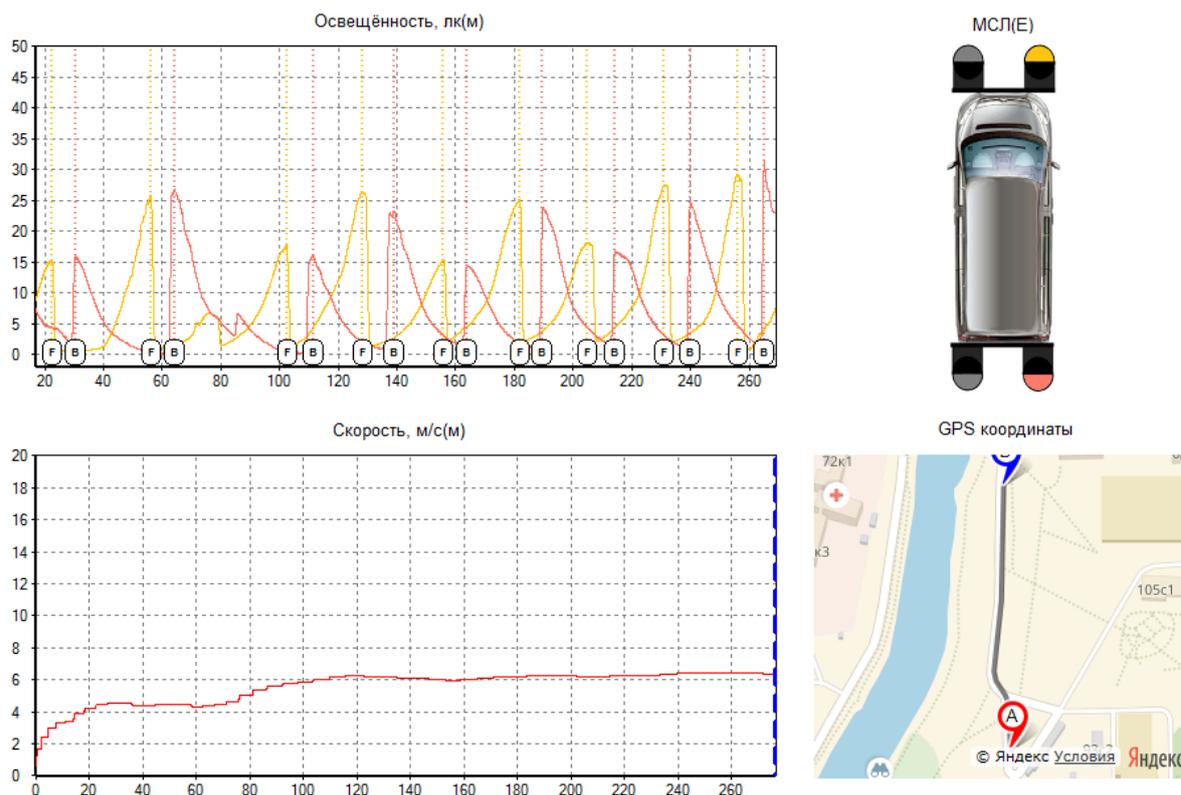


Рис. 50. Вкладка определения расположения опор»

В верхнем части окна представлены графики освещённости двух правых датчиков (лк) от расстояния (м). Метки «F» и «B» указывают на автоматически найденные расположения фронтов по данным освещённости от передних (Front) и задних (Back) датчиков соответственно. Все графики переходят к зависимостям от расстояния, а не от времени. В нижнем окне представлена скорость в системе СИ (м/с) от расстояния (м).

Метки на графике освещённости можно передвигать, добавлять, удалять с помощью действий левой кнопкой мыши. Метки «F» и «B» составляют собой пару, которая определяет расположение опоры. Поэтому добавлять новую метку между двумя парами нельзя. А одинокая метка без пары становится красной и не участвует в расчёте:

Сведение данные

Далее производится попарное сведение результатов передних и соответствующих им задних ФМУ в момент времени, когда они оба находились в одной и той же точке пространства (рис. 51).

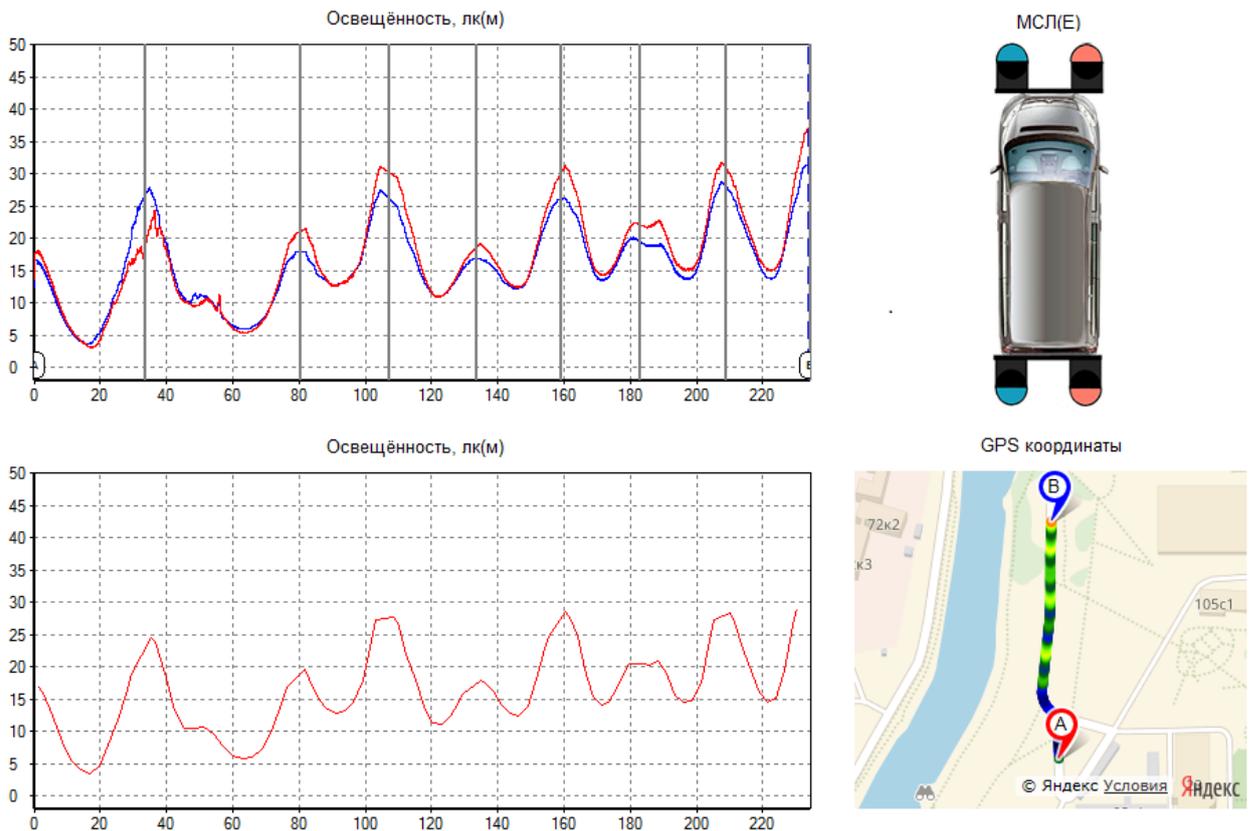


Рис. 51. Вкладка «Суммарные данные»»

В верхней половине окна представлены графики суммарных значений освещённости (лк) с попарных левых (синий) и правых (красный) датчиков ФМУ от расстояния (м). В нижней половине окна представлен график усредненной освещённости (лк) со всех датчиков ФМУ от расстояния (м) сглаженный и дискретизированный для дальнейшего нанесения на карту. Границы участка измерений определяются расположением крайних опор.

В окне «GPS Координаты» отображаются значения освещенности в псевдоцветах (рис. 52).

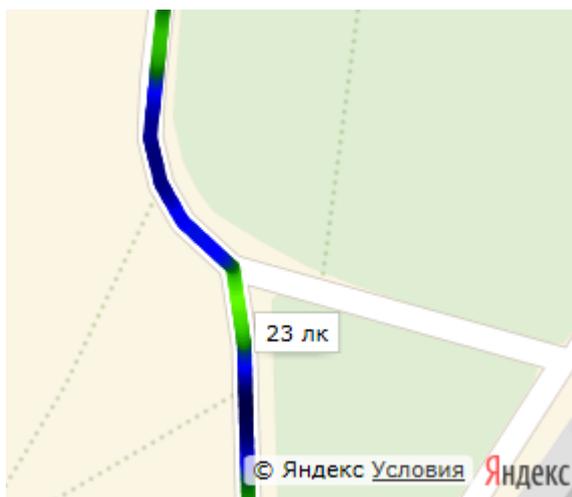


Рис. 52. GPS Координаты.

Результаты измерений

Для дальнейшего расчёта перейдите по вкладке «Результаты» (рис. 53).

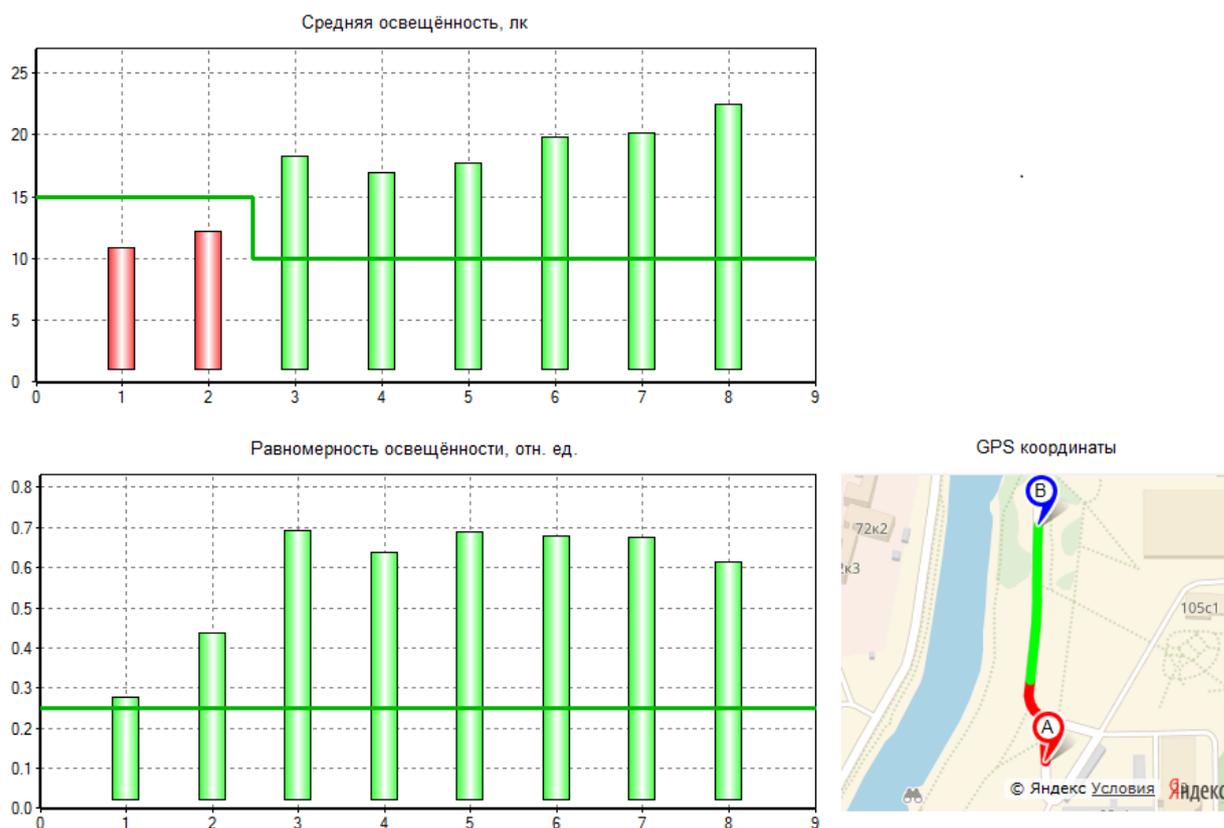


Рис. 53. Вкладка «Результаты».

На этой вкладке представлены гистограммы рассчитанных нормируемых параметров для каждого интервала между опорами. В верхней

половине окна – средняя освещённость (лк), на нижней равномерность освещённости (отн.ед).

Зелёная линия на обоих графиках показывает действующее нормативное значение для этого типа дорог. Так как на одной улице могут быть участки с разными классами дорог, то и нормируемые показатели для разных интервалов могут быть разные. Если рассчитанные значения показателей выше нормируемых, то столбец закрашивается зелёным, если же нет, то красным.

В окне «GPS Координаты» отображаются участки, соответствующие и несоответствующие нормам.

3.3 Выгрузка результатов

Результаты измерений выгружаются бинарным файлом, который хранятся в специальной базе данных в виде протоколов измерений который привязывается к конкретному объекту освещения (улице) и договору от определенной организации.

3.4 Итог

Был разработан программный продукт, который

- Отображает данные измерений МСЛ(Е)
- Производит сортировку входных данных
- Обладает удобным инструментарием для анализа данных
- Автоматически определяет расположение опор
- Реализует обработку данных по методу мониторинг дорожного освещения
- Производит корректировку GPS координат маршрута проведенных измерений подготавливая результаты измерений для нанесения их на карту
- Позволяет осуществить механизм паспортизации дорог с указанием их класса по освещению
- Осуществляет выгрузку результатов обработки в единую базу данных

*Программа была написана на языке программирования C++ в среде разработки программного обеспечения «Microsoft Visual Studio 2007».

4 Экспериментальная часть

4.1 Измерения

Измерения проводились с помощью МСЛ ВНИСИ по адресу: г. Москва, ул. Шитова (возле Черкизовского пруда) (рис.54, 55).

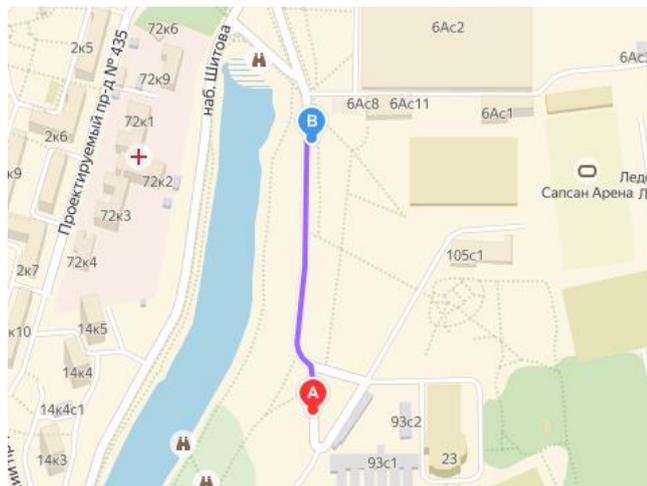


Рис. 54. Маршрут измерений на карте.



Рис. 55. Фотография дороги на которой производились измерения.

Суть анализа будет заключаться в оценке погрешностей нормируемых параметров (средняя освещенность и равномерность освещенности) рассчитанными разными способами, с помощью нескольких повторных измерений.

Точность расчёта средней освещённости зависит от количества точек усреднения. Точность же равномерности освещённости кроме того зависит от точности нахождения минимума на измеренном участке.

На набережной Шитова имеем массив из 9 повторных измерений для 8 интервалов между опорами. Для каждого интервала измерений рассчитываем нормируемые показатели и строим матрицу данных из $n=9$ столбцов измерений и $m=9$ строк интервалов между опорами. (см. Приложение В), по которой и будем производить статистический анализ (рис 56).

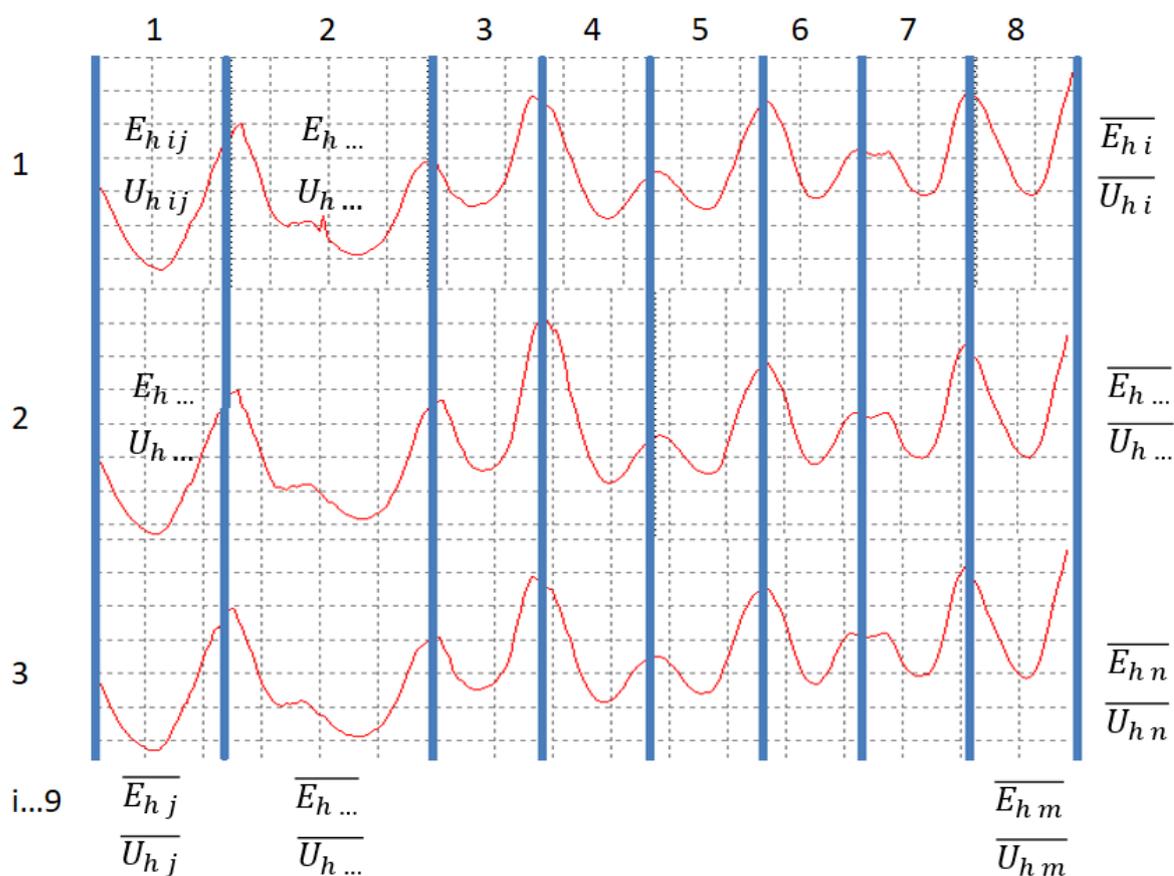


Рис. 56. Графики освещенности на расчётном участке. Матрица результатов измерений.

Среднее арифметическое между повторными измерениями:

$$\overline{E_{h j}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_{h ij} \quad (9)$$

$$\overline{U_{hj}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{hij} \quad (10)$$

Среднее арифметическое между расчётными интервалами:

$$\overline{E_{hi}} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m E_{hij} \quad (11)$$

$$\overline{U_{hi}} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m U_{hij} \quad (12)$$

Оценка погрешности измерений

Оценка осуществляется с помощью среднеквадратичного отклонения всех повторных измерений.

$$S_{E_{hj}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_{hij} - \overline{E_{hj}})^2}{n}} \quad (13)$$

$$S_{U_{hj}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (U_{hij} - \overline{U_{hj}})^2}{n}} \quad (14)$$

Среднее среднеквадратичное отклонение значений со всех интервалов:

$$\overline{S_{E_h}} = \frac{\sum_{j=1}^m \overline{S_{E_{hj}}}}{m} \quad (15)$$

$$\overline{S_{U_h}} = \frac{\sum_{j=1}^m \overline{S_{U_{hj}}}}{m} \quad (16)$$

Относительная погрешность j-того измерения:

$$\delta_{E_{hj}} = \frac{t_p * S_{E_{hj}}}{\overline{E_{hj}}} \quad (17)$$

$$\delta_{U_{hj}} = \frac{t_p * S_{U_{hj}}}{\bar{U}_{hj}} \quad (18)$$

Где, t_p -двусторонний критерий Стьюдента равен 2,306 для доверительной вероятности с надежностью $p = 0,95$ и числом степеней свободы $f = m-1=8$.

Средняя относительная погрешность между всеми повторными измерениями:

$$\overline{\delta_{E_h}} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \delta_{E_{hj}} \quad (19)$$

$$\overline{\delta_{U_h}} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \delta_{U_{hj}} \quad (20)$$

Таблица 1. Оценка погрешности измерений.

i	1	2	3	4	5	6	7	8	среднее
$\bar{E}_{h,лк}$	10,63	12,33	19,00	17,43	18,23	19,62	20,65	22,49	17,55
S_{E_h}	0,18	0,24	0,93	0,99	0,78	0,32	0,38	0,49	0,54
δ_{E_h}	3,9 %	4,5 %	11,3 %	13,1 %	9,9 %	3,8 %	4,2 %	5,0 %	7,0 %
$\bar{U}_{h,о.е.}$	0,31	0,42	0,63	0,61	0,65	0,66	0,64	0,60	0,57
S_{U_h}	0,01	0,01	0,04	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
δ_{U_h}	6,5 %	6,1 %	13,3 %	5,7 %	5,7 %	4,5 %	7,4 %	9,6 %	7,4 %

Вывод: Относительная погрешность измерений в среднем составляет примерно 7% как для средней освещенности, так и для равномерности освещенности, что удовлетворяет предельно допустимым 10% и 20% для данного метода измерений.

Оценка ошибки случайности выбранного интервала измерений

Оценка осуществляется с помощью среднеквадратичного отклонения всех интервалов измерений аналогично оценке погрешности измерений, только теперь расчёт среднеквадратичного отклонения производится по интервалам между опорами для каждого измерения.

$$S_{E_{hi}} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (E_{hij} - \overline{E_{hi}})^2}{m}} \quad (21)$$

$$S_{U_{hi}} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (U_{hij} - \overline{U_{hi}})^2}{m}} \quad (22)$$

Среднее среднеквадратичное отклонение значений со всех повторных измерений:

$$\overline{S_{E_h}} = \frac{\sum_{i=1}^n \overline{S_{E_{hi}}}}{n} \quad (23)$$

$$\overline{S_{U_h}} = \frac{\sum_{i=1}^n \overline{S_{U_{hi}}}}{n} \quad (24)$$

Относительная погрешность i -того интервала:

$$\delta_{E_{hi}} = \frac{t_p * S_{E_{hi}}}{\overline{E_{hi}}} * 100\% \quad (25)$$

$$\delta_{U_{hi}} = \frac{t_p * S_{U_{hi}}}{\overline{U_{hi}}} * 100\% \quad (26)$$

Где, t_p -двусторонний критерий Стьюдента равен 2,365 для доверительной вероятности с надежностью $p = 0,95$ и числом степеней свободы $f = n-1=7$.

Средняя относительная погрешность между всеми интервалами:

$$\overline{\delta_{E_h}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_{E_{hi}} \quad (27)$$

$$\overline{\delta_{U_h}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_{U_{hi}} \quad (28)$$

Таблица 2. Оценка случайности интервала

j	$\bar{E}_{h,лк}$	S_{E_h}	δ_{E_h}	$\bar{U}_h, о.е.$	S_{U_h}	δ_{U_h}
1	17,18	3,35	46	0,57	0,11	47
2	18,19	3,76	49	0,55	0,11	46
3	18,13	3,72	49	0,56	0,12	49
4	18,03	3,86	51	0,57	0,11	45
5	17,18	3,55	49	0,57	0,11	46
6	17,51	3,65	49	0,56	0,11	47
7	17,11	3,50	48	0,58	0,12	49
8	17,36	3,60	49	0,58	0,12	49
9	17,24	3,51	48	0,56	0,11	48
средняя	17,55	3,61	49	0,57	0,11	47

Вывод: в среднем разница рассчитанных параметров между всеми интервалами примерно плюс минус 48%. Это говорит о том, что при случайном выборе контрольного интервала результаты будут сильно отличаться.

Усреднение по интервалам

Как уже было упомянуто ранее одним из решения проблемы с ошибкой случайно выбранного участка, является усреднение рассчитанных нормируемых значений между всеми интервалами. Оценим насколько это может быть эффективно. Для этого найдём среднеквадратичное отклонение выборки из средних значений между всеми интервалами.

Таблица 3. Усреднение по интервалам

j	$\bar{E}_{h,лк}$	$\bar{U}_h, о.е.$
1	17,18	0,57
2	18,19	0,55
3	18,13	0,56
4	18,03	0,57
5	17,18	0,57
6	17,51	0,56
7	17,11	0,58
8	17,36	0,58

средняя	17,55	4,06
---------	-------	------

Среднеарифметическое средних значений между всеми интервалами

$$\overline{E_{h \text{ cp}}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \overline{E_{hi}} \quad (29)$$

$$\overline{U_{h \text{ cp}}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \overline{U_{hi}} \quad (30)$$

Среднеквадратичное отклонение между всеми интервалами:

$$S_{E_h}' = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (\overline{E_{hi}} - \overline{E_{h \text{ cp}}})^2}{m}} \quad (31)$$

$$S_{U_h}' = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (\overline{U_{hi}} - \overline{U_{h \text{ cp}}})^2}{m}} \quad (32)$$

Относительная погрешность выборки от среднего:

$$\delta_{E_h}' = \frac{t_p * S_{E_h}}{\overline{E_{h \text{ cp}}}} * 100\% \quad (33)$$

$$\delta_{U_h}' = \frac{t_p * S_{U_h}}{\overline{U_{h \text{ cp}}}} * 100\% \quad (34)$$

Таблица 4. Погрешность с усреднением по интервалам

i	$\overline{\sigma}_{\text{cp}}$	S	δ	S'	δ'	δ/δ'
\overline{E}_h	17,55	0,54	7,0%	0,42	5,5%	1,27
\overline{U}_h	0,57	0,018	7,4%	0,01	3,6%	2,05

Вывод: Усреднение по интервалам уменьшает погрешность результатов средней освещенности примерно в 1,3 раза, а равномерности освещенности в 2 раза.

Уменьшение шага расчётной сетки

Оценка того насколько изменится погрешность результатов если уменьшить шаг расчётной сетки. Шаг был взят предельно возможный в 0,01 м.

Таблица 5. Уменьшение шага расчётной сетки

Параметр	S	δ	S'	δ'	δ / δ'
$\bar{E}_{h,лк}$	0,54	7,0%	0,57	7,5%	0,93
$\bar{U}_{h,о.е.}$	0,018	7,4%	0,021	7,2%	1,02

Где S , δ – значение общего среднего среднеквадратичного отклонения рассчитанного с тем шагом сетки который принят в действующих нормативных документах. S' , δ' – значение общего среднего среднеквадратичного отклонения рассчитанного с шагом 0,01 м.

Вывод: Исследование показало, что уменьшение шага сетки до предельно возможного в 0,01 м практически никак не влияет на погрешность измерений, а даже незначительно его ухудшает. Последнее правда совершенно может не является показателем тренда так как изменения совсем незначительны.

Интегральный способ расчёта равномерности освещенности

В действующих нормативных документах указано что равномерность освещенности зависит от точечного и очень уязвимого параметра, а именно абсолютного минимума освещенности среди всех контрольных точек на расчётном интервале. По сути в нормах косвенно указано ниже какого значения освещённость не должна опускаться ни в одной точке расчётного поля:

$$E_{h \min} = \frac{\overline{E_{h \text{ н}}}}{U_{h \text{ н}}} \quad (35)$$

И если при статическом методе это было допустимо и логично по ряду причин, то для мобильных измерений, такое положение дел, особенно при использовании более мелкого шага расчётной сетки может сильно ухудшить погрешность измерений. Таким образом если бы можно было ввести какую ни будь интегральную статистическую величину, которая могла бы быть

аналогом абсолютного минимума освещенности, то это могло бы улучшить текущее положение дел.

Такой величиной может служить левая граница доверительного интервала, которая используется в статистике при анализе случайных процессов, которые близки к нормальному закону распределения (рис. 57).

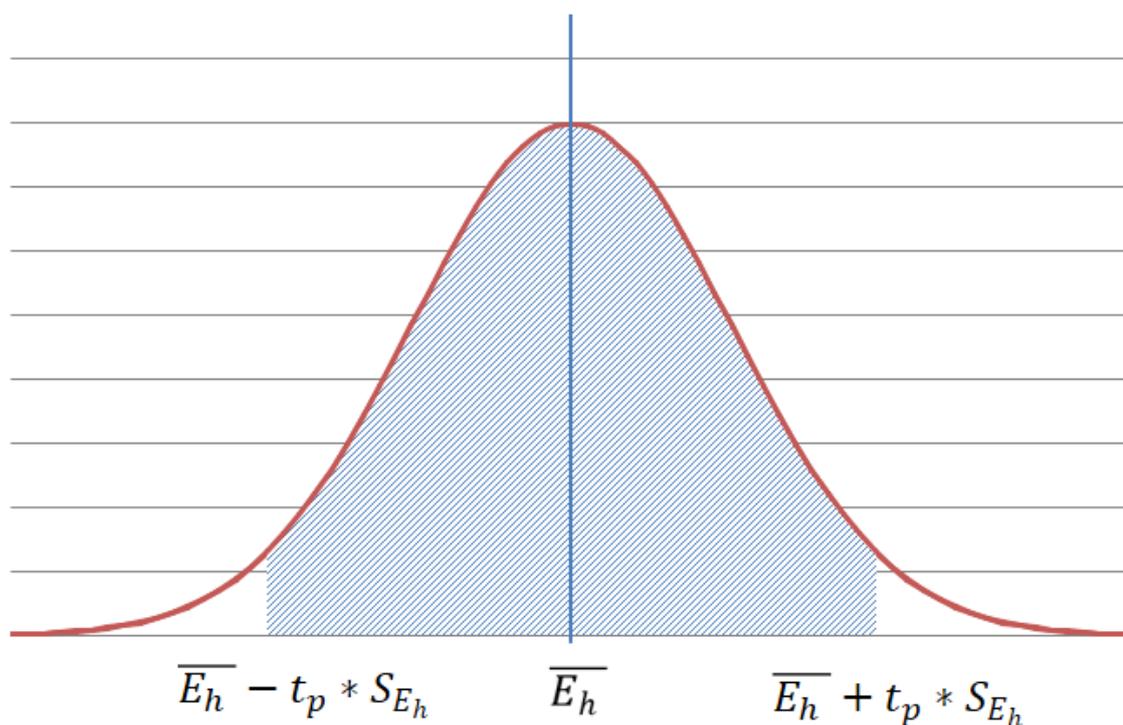


Рис. 57. Плотность вероятности нормального распределения. Двусторонний доверительный интервал.

Где S_{E_h} – среднеквадратичное отклонение освещенности, t_p – двусторонний критерий Стьюдента, \bar{E}_h – среднее арифметическое значение выборки или средняя освещенность.

Однако нас интересуют только те значения, которые меньше среднего, поэтому все значения, которые выше среднего мы просто не используем в расчёте тем самым увеличивая надежность результата (рис. 58).

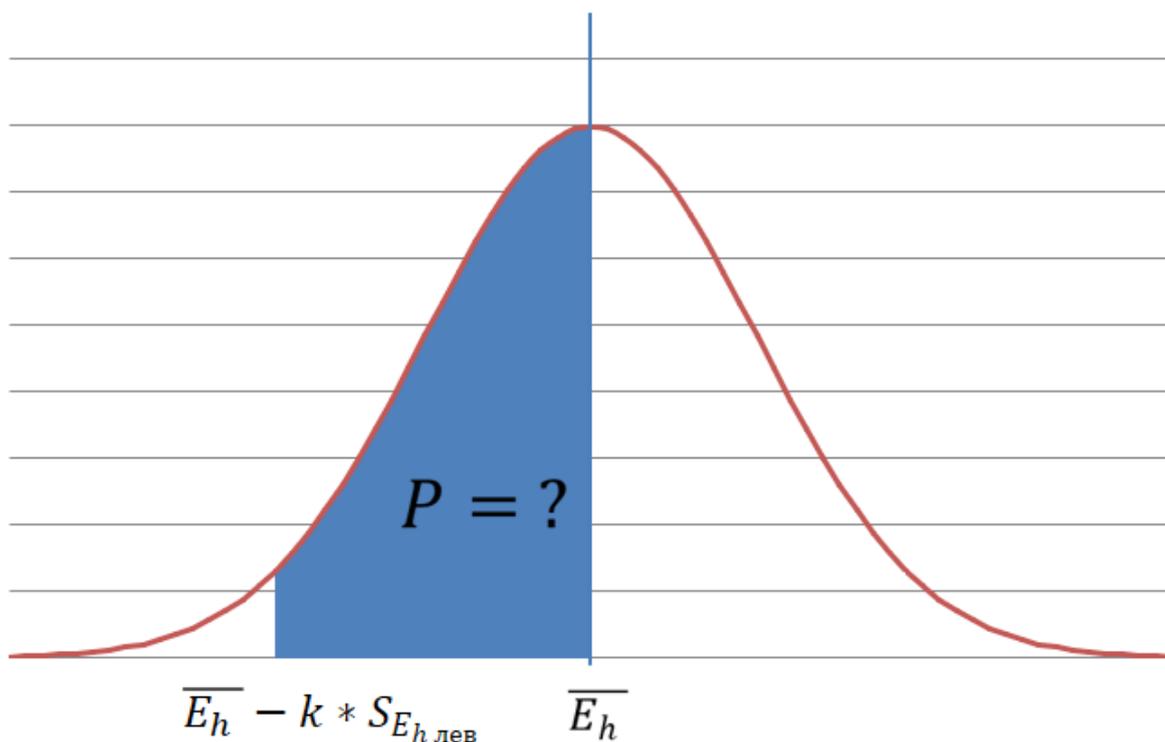


Рис. 58. Плотность вероятности нормального распределения. Односторонний доверительный интервал.

Где $S_{E_h,лев}$ – одностороннее среднеквадратичное отклонение освещенности

$$S_{E_h,лев} = \sqrt{\frac{1}{n_{лев}} \sum_{i=1}^{n_{лев}} (E_{hi,лев} - \overline{E}_h)^2} \quad (36)$$

Где $E_{hi,лев}$ - освещенность меньше среднего, $n_{лев}$ – количество значений меньше среднего.

Затем рассчитаем ширину доверительного интервала:

$$\Delta E_h = k * S_{E_h,лев} \quad (37)$$

И его левую границу:

$$E_{h,min'}(k) = \overline{E}_h - \Delta E_h \quad (38)$$

Этот интегральный аналог минимума представляет из себя величину с заданной степенью надёжности (k), которая указывает, что с некоей вероятностью P измеренные значения освещённости лежат не ниже её значения. Поделив это значения на среднюю освещённость, найдём интегральный аналог равномерности:

$$U_h'(k) = \frac{E_{h \min}'(k)}{\bar{E}_h} \quad (39)$$

Таким образом для того чтобы ввести новую статистическую характеристику, не потребуется изменять существующие нормативные показатели. Необходимо лишь определиться со степенью надёжности и что он характеризует.

Если бы значения освещённости на интервале между опорами подчинялись нормальному закону распределения, то можно было бы сказать, что k – это односторонний критерий Стьюдента, для которого зависимость $k(P)$ известна. Однако статистический анализ подтверждает, что освещённость не подчиняется нормальному закону (что было предсказуемо) (рис. 59).

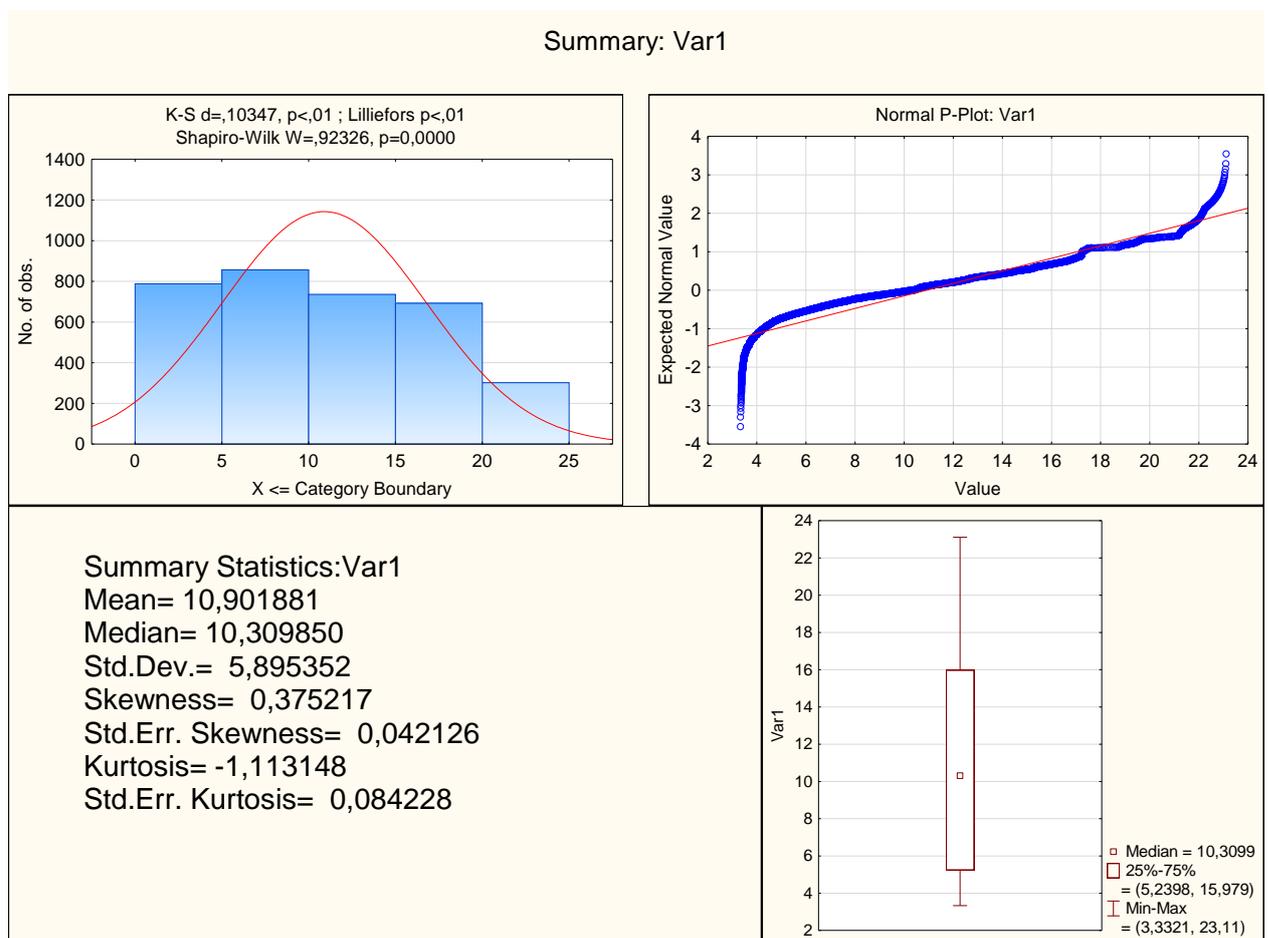


Рис. 59. Суммарная информация по статистическому анализу в программе «Statistika». Левый верхний угол – частотный график и результаты тестов Колмогорова-Смирнова и Шапиро-Вилка; правый верхний угол – нормально вероятностный график, левый нижний – рассчитанные статистические характеристики: среднее, медиана, среднеквадратичное отклонение, коэффициент асимметрии, стандартная ошибка асимметрии, коэффициент Экссесса и стандартная ошибка Экссесса, правый нижний ящичная диаграмма.

Для статистического анализа на проверку гипотезы о нормальности были взяты значения освещённости для первого интервала между опорами первого измерения.

Тесты Колмогорова-Смирнова и Шапиро-Вилка были не пройдены что является достаточным основанием чтобы отвергнуть гипотезу о нормальности.

На нормально вероятностном графике и на частотном графике видно, что значения меньше среднего начинают слишком резко уходить вниз. Поэтому стоит предположить, что k – коэффициент надежности будет давать меньшую вероятность P при тех же значениях чем односторонний t критерий Стьюдента.

Расчёт

Проведем расчёт погрешности измерений с применением расчёта равномерности освещенности как старым точечным методом (\overline{U}_h), так и новым с значениями коэффициента надежности (\overline{U}_h ') $k=1.64$, для одностороннего критерия Стьюдента - $p=0.95$ и (\overline{U}_h ") $k=1.28$, $p=0.90$ соответственно.

Таблица 6. Интегральная равномерность

	1	2	3	4	5	6	7	8
\overline{U}_h	0,31	0,42	0,63	0,61	0,65	0,66	0,64	0,60
$\overline{U}_{h k=1.64}$	0,21	0,42	0,58	0,56	0,63	0,64	0,64	0,59
$\overline{U}_{h k=1.50}$	0,27	0,47	0,62	0,60	0,67	0,67	0,67	0,62
$\overline{U}_{h k=1.28}$	0,38	0,55	0,68	0,66	0,71	0,72	0,72	0,68

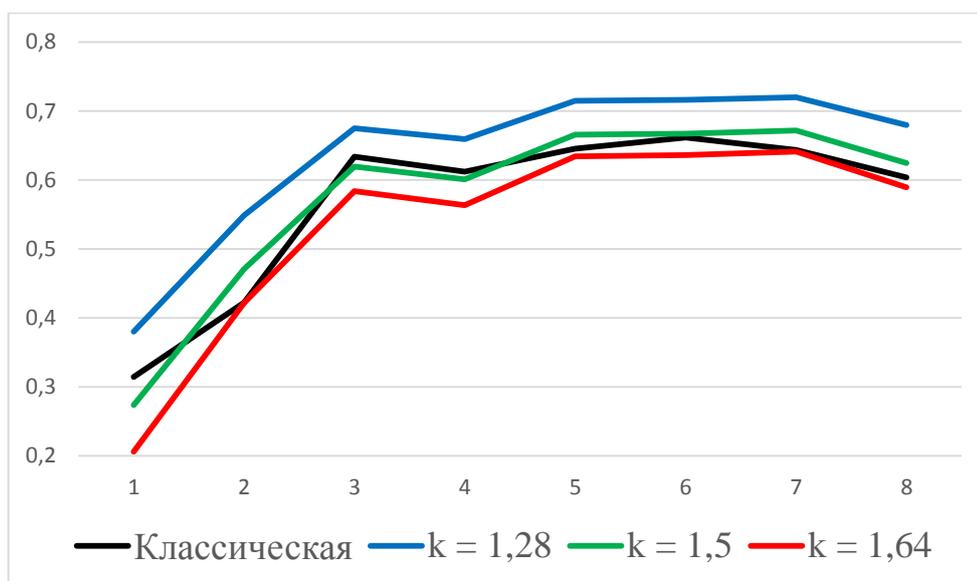


Рис. 60. Точечная и интегральная средняя равномерность освещенности всех интервалов.

Таблица 7. Сравнение погрешностей разных способов расчёта

$\delta / \delta_{k=1,28}$	$\delta / \delta_{k=1,50}$	$\delta / \delta_{k=1,64}$
1,27	0,97	0,80

Вывод: Видно, что с увеличением коэффициента жесткости значения равномерности освещенности уменьшаются (рис. 60). Погрешность результатов тоже уменьшается (таблица 7). Нужно подобрать такое значение коэффициента жесткости, который бы давал меньшую погрешность и адекватные значения равномерности освещенности. Оптимальный выбор этого коэффициента должен быть основан на дополнительных исследованиях.

Сглаживание

В данном анализе применялось сглаживание по методу сплайнов Безье. Выяснилось, что существенного уменьшения погрешности результатов измерений с помощью сглаживания не добьёшься, однако оно может быть полезно как минимум в двух случаях:

Первый это когда иногда датчик начинает выдавать осциллирующие значения, их можно слегка сгладить, хотя при наблюдаемых не больших уровнях осцилляции это не сильно повлияет на результат (рис. 61,62).

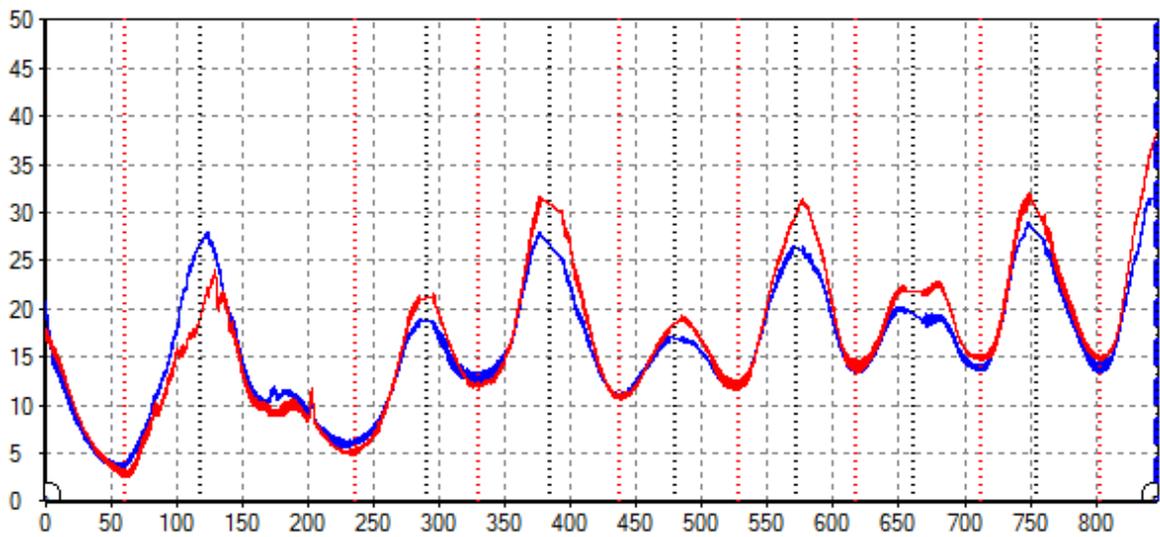


Рис. 61. Не сглаженные значения освещенности на расчётном участке.

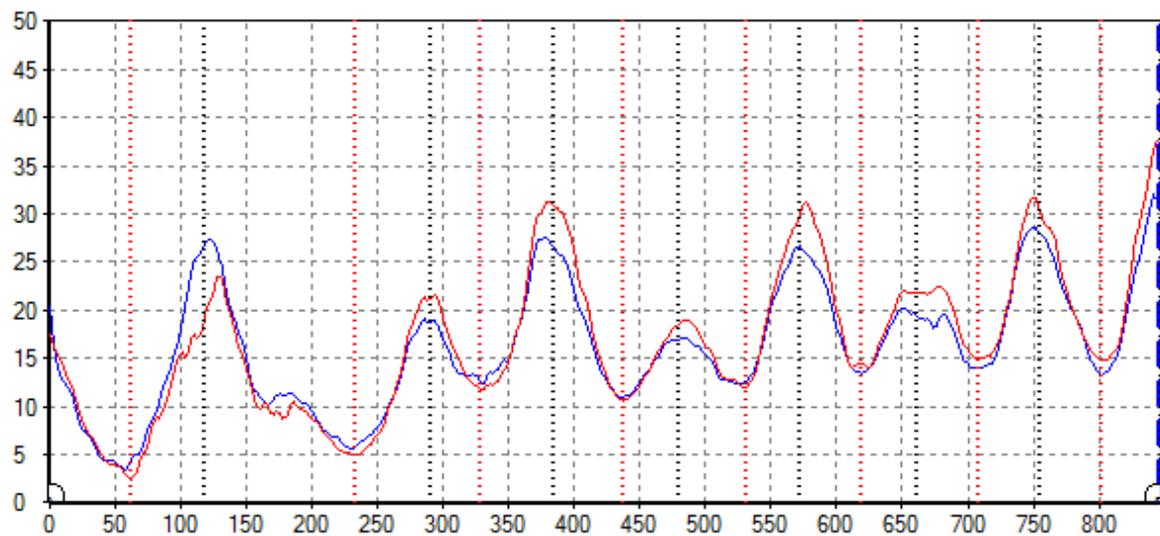


Рис. 62. Сглаженные значения освещенности на расчётном участке.

Более же эффективно применение сглаживания при затенениях. Так, например, на второй полосе измеренного участка один из светильников с одной стороны сильно перекрыт ветками дерева (рис. 63).

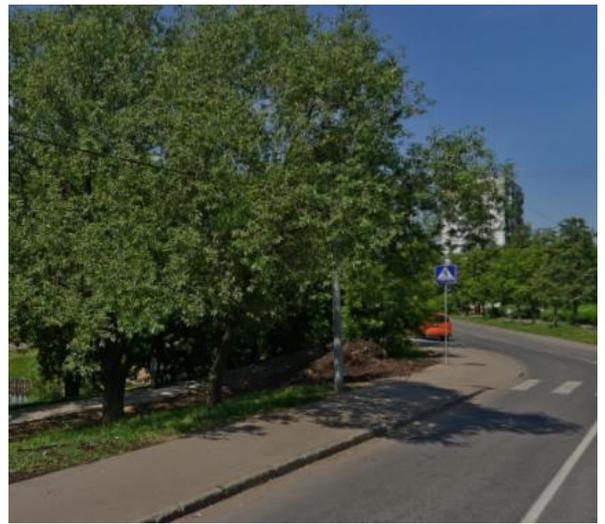


Рис. 63. Фотография участка измерений затененного деревом.

Этот вносит очевидную нелинейность в результаты измерений. Благодаря довольно большому сглаживанию по сплайну, а также усреднению данных между правыми и левыми датчиками данные приобретают более-менее линейный вид. Сглаживание особо сильно влияет на равномерность освещённости, так как абсолютный минимум результатов измерений сильно попадает под удар сглаживания (рис. 64).

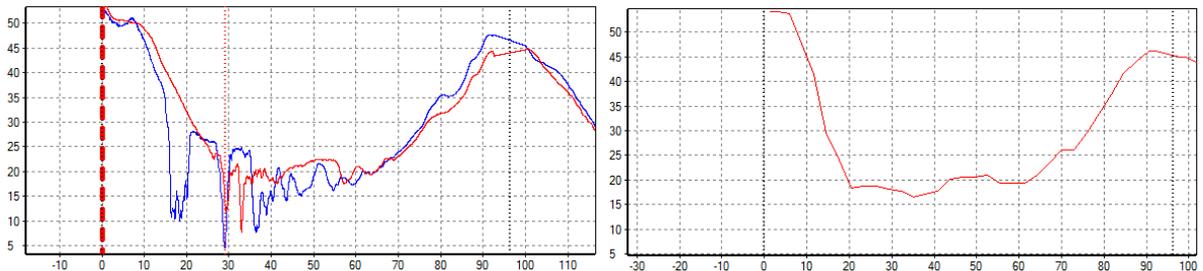


Рис. 64. Сильное сглаживание затененного участка.

Равномерность освещённости сильно растёт, причём до такой степени что может удовлетворить нормативным показателям. В то же время значения равномерности на других участках практически не меняются (рис. 64).

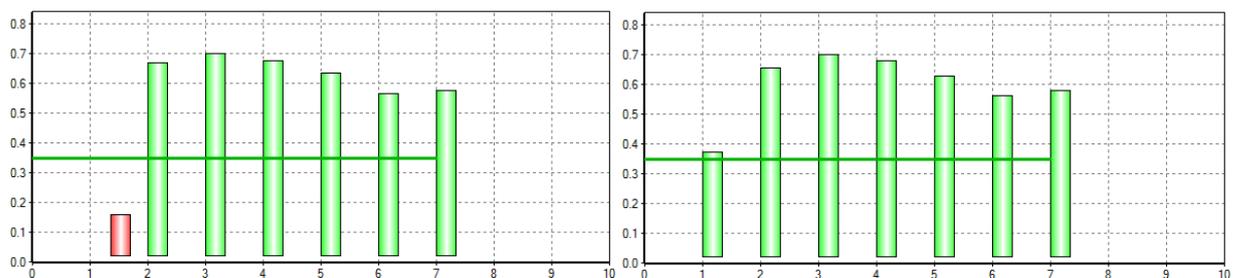


Рис. 65. Эффект сглаживания. Рассчитанные значения равномерности освещенности.

Вывод: Сглаживание в малых значениях можно применять с целью улучшения внешнего вида графиков до тех значений пока оно не влияет на результат. Сглаживание сильных выбросов может быть эффективно (до того момента пока значения незатененных участков не меняются), однако не стоит забывать, что объекты затенения тоже несут полезную информацию и должны фигурировать в отчёте о измерениях.

Выводы

В проведённой работе был реализован программный продукт, в котором производится расчёт нормируемых параметров по мобильным методам измерения освещенности в том числе и мониторинга дорожного освещения, а также корректировка GPS координат для последующей выгрузки рассчитанных результатов измерений в базу данных и отображения на карте.

Также было проведено исследование алгоритмов обработки данных измерений в результате которого выяснилось, что:

- Относительная погрешность измерений как средней освещенности, так и равномерности освещенности для 9 повторных измерений участка дороги с 8 интервалами между опор составляет 7%, что удовлетворяет предельно допустимым погрешностям данного метода измерений.
- случайность выбранного расчётного участка сильно влияет на погрешность измерений вплоть до разброса результата на 48%.
- расчёт нормируемых параметров как среднее между всеми измеренными интервалами между опорами увеличивает повторяемость измерений средней освещенности в 1.3 раза, а равномерности освещенности в 2 раза.
- Уменьшение шага расчётной сетки при расчёте нормируемых параметров очень слабо сказывается на погрешности измерений.
- Не удалось с помощью сглаживания данных по методу сплайнов Безье уменьшить погрешность измерений. Может служить инструментом для маскирования затенений.
- Замена точечной равномерности освещенности на аналогичную ей интегральную величину может уменьшить погрешность. Однако требуются дополнительные исследования значения и роли коэффициента жёсткости в уравнении.

Рекомендации

- Мобильные методы измерения позволяют отказаться от случайности выбора характерного интервала и производить измерения освещенности по всей длине дороги с расчётом нормативных параметрах на всех интервалах между опорами. Усредненные значения измеренных нормируемых величин также могут быть не совсем адекватной характеристикой освещения для всего участка дороги. На сегодняшний день имеется возможность быстро и удобно выводить в отчёте об измерениях рассчитанные значения нормируемых параметров в виде графиков, таблиц и гистограмм, и карт для большого набора данных. Поэтому рекомендуется производить расчёт для каждого интервала между

опорами в отдельности и всё отображать в отчёте измерений, что повысит его информативность и способствуют более грамотному принятию решения на его основе.

- Применение интегральной характеристики равномерности освещенности для мобильных методов измерения может оказаться действительно необходимой потребностью, в связи с почти непрерывным характером измерений. Поэтому необходимы дополнительные исследования связанные с определением роли коэффициента жесткости в уравнении нижней границы доверительного интервала значений освещенности между двух соседних опор.

Список использованной литературы

1. Международное автомобильное аналитическое агентство «Wards Auto» [Электронный ресурс] – Режим доступа: (<http://wardsauto.com/news-analysis/world-vehicle-population-tops-1-billion-units>)
2. Российское автомобильное аналитическое агентство «Автостат» [Электронный ресурс] – Режим доступа: (<https://www.autostat.ru/news/32958>)
3. ГИБДД России [Электронный ресурс] – Режим доступа: (<http://stat.gibdd.ru/>)
4. Официальный сайт мэра Москвы [Электронный ресурс] – Режим доступа: (<https://www.mos.ru/news/item/35174073>)
5. Комплекс градостроительной политики и строительства Москвы. Дороги [Электронный ресурс] – Режим доступа: (<https://stroj.mos.ru/road>)
6. Комплекс градостроительной политики и строительства Москвы. Планы строительства [Электронный ресурс] – Режим доступа: (<https://stroj.mos.ru/news/bolieie-100-km-dorogh-postroiat-v-moskvie-v-2018-ghodu-sobianin>)
7. World health organization, «Global status report on road safety 2015», 2017
8. Щербакова Е.М. Россия: предварительные демографические итоги 2017 года (часть II). Демоскоп Weekly. 2018. № 761-762
9. Экспертный совет НИУ ВШЭ. Безопасность дорожного движения в России: современное состояние и неотложные меры по улучшению ситуации. 2013.
10. S. Fotios, R. Gibbons. Road lighting research for drivers and pedestrians: The basis of luminance and illuminance recommendations. Lighting Res. Technol. 2018; Vol. 50: 154–186
11. Swedish National Road and Transport Research Institute. Road Surface Tester. [Электронный ресурс] – Режим доступа: (<https://www.vti.se/en/research-areas/on-road-measurement/measurement-of-road-surface/>)
12. Iowa Department of Transportation [Электронный ресурс] – Режим доступа: (<https://www.iowadot.gov>).
13. ICE tool [Электронный ресурс] – Режим доступа: (<https://www.arcgis.com/home/item.html?id=a2e06a34b0fb49f69227df9a127e95ab>).
14. Iowa Department of Transportation ICE 2016-2017 Highway Planning Report.
15. Schmidt F. Dynamic method for measuring luminance on roads and in tunnels. Svetotekhnika.# 3. 2005. pp. 13-16.

16. Iacomussi P., Rossi G., Castellano M. The development of a new mobile photometric laboratory. Report on CIE session, 2005 г.
17. Flodina T. L., Chernyak A. S., A mobile laboratory for measuring photometric parameters in outdoor lighting installations. Light & Engineering Vol. 15, № 1, pp. 34-38, 2007.
18. Gibbons R. B., Meyer J., Edwards C.J., Development of a Mobile Measurement System for Roadway Lighting, NSTSCE, 2018.
19. Bhagavathula R., Gibbons R. B, Travis T. N., Rural Intersection Lighting Safety Analysis, NSTSCE, 2017.
20. Lux Mapping System [Электронный ресурс] – Режим доступа: (<http://www.luxmapping.com/>)
21. Мобильная светотехническая лаборатория ВНИСИ [Электронный ресурс] – Режим доступа (<http://www.vnisi.ru/joomla/ru/services/mobilnaja-svetotekhnicheskaja-laboratorija>)
22. Volf Sh., Kruger U., Shmidt F. Use of high resolution in light and colour measurements. Svetotekhnika. № 5. 2005. pp. 57-63.
23. Живописцев И. Ф., Коробко А. А., Черняк А. Ш., Проблемы нормирования и контроля освещения российских автодорог и пути их решения, Светотехника. № 6. 2011. Pp 12-15.
24. CIE 194-2011 On site measurement of the photometric properties of road and tunnel lighting
25. ОДМ Технические требования к мобильной светотехнической лаборатории методика измерения освещенности на дорожном покрытии, Федеральное дорожное агентство (Росавтодор), 2017.
26. ГОСТ Р 55707-2013 «Методы измерений нормируемых параметров».
27. ПНСТ 26-2015 «Автодороги общего пользования. Методы измерений».
28. ГОСТ Р 55708-2013 «Методы расчета нормируемых параметров».
29. ПНСТ 27-2015 «Автодороги общего пользования. Нормы и методы расчета».
30. ГОСТ Р 56334-2015 «Тоннели автодорожные. Освещение искусственное. Нормы и методы расчета».
31. ГОСТ Р 56239-2014 «Тоннели автодорожные. Искусственное освещение. Методы измерения нормируемых параметров».
32. ГОСТ Р 55708-2013 «Методы расчета нормируемых параметров».
33. Российская газета «rg.ru» [Электронный ресурс] – Режим доступа: (<https://rg.ru/2017/10/17/reg-cfo/posle-modernizacii-ulichnogo-osveshcheniia-v-orle-stalo-temnee.html>)
34. Korobko A.A., Chernyak A. S., Improvement of mobile method for measuring illuminance of a road, Proceeding of 28th CIE Session 2015.

35. Тюхтинова А.А., учебно–методическое пособие «Методы дискретной оптимизации», НГУ им. Н.И. Лобачевского, 2014

Приложение А. Классы дорог и нормируемые значения.

Категории и классы по освещению объектов улично-дорожной сети, предназначенных для движения транспорта

Категория объекта		Класс объекта по освещению	Основное назначение объекта	Транспортная характеристика	Расчетная скорость движения, км/ч	Число полос движения	Пропускная способность, тыс. ед/ч
А Магистральные дороги и улицы общегородского назначения	За пределами центра города*	А1	Автомагистрали, федеральные и транзитные трассы, основные магистрали города	Все виды транспорта, движение непрерывное, пересечения в разных уровнях	100	6—8	Св. 10
		А2	Прочие федеральные дороги и основные улицы	Все виды транспорта, движение непрерывное и регулируемое, пересечение с магистралями в одном или разных уровнях	80—100	6—8	7—9
	В центре города	А3	Центральные магистрали, связующие улицы с выходом на магистрали класса А1	Все виды транспорта, кроме грузового, не связанного с обслуживанием центра. Интенсивное пешеходное движение, движение регулируемое, пересечение с магистралями в одном уровне	90	6—8	4—7
		А4	Основные исторические проезды центра, внутренние транспортные связи центра города	Все виды транспорта, кроме грузового, не связанного с обслуживанием центра. Интенсивное пешеходное движение, движение регулируемое, пересечение с магистралями в одном уровне	80	4—6	3—5

Категория объекта		Класс объекта по освещению	Основное назначение объекта	Транспортная характеристика	Расчетная скорость движения, км/ч	Число полос движения	Пропускная способность, тыс. ед/ч
Б Магистрали и улицы районного значения	За пределами центра города	Б1	Основные дороги и улицы района районного значения	Все виды транспорта, движение регулируемое, пересечения в одном уровне	60—70	4-6	3—5
	В центре города	Б2		Все виды транспорта, кроме грузового, не связанного с обслуживанием центра, движение регулируемое, пересечения в одном уровне	60	3—6	2—5
В Улицы местного значения	Жилая застройка за пределами центра города	В1	Транспортные и пешеходные связи в пределах жилых районов и выход на магистрали, кроме улиц с непрерывным движением	Легковой, специальный и обслуживающий грузовой транспорт, иногда общественный пассажирский, движение регулируемое, пересечения в одном уровне	60	2—4	1,5—3
	Жилая застройка в центре города	В2	Транспортные и пешеходные связи в жилых микрорайонах, выход на магистрали	Легковой, специальный и обслуживающий грузовой транспорт, движение регулируемое, пересечения в одном уровне	60	2—4	1,5—3
	В городских промышленных, коммунальных и складских зонах	В3	Транспортные связи в пределах производственных и коммунально-складских зон	Все виды транспорта, движение регулируемое, пересечения в одном уровне	60	2—4	0,5—2

* Центр города – территория центральной части города, устанавливаемая городскими властями.

Нормы освещения проезжей части в зависимости от категории и класса объектов улично-дорожной сети для городских поселений

Категория объекта	Класс объекта по освещению	\bar{L} , кд/м ² , не менее	U_0 , не менее	U_1 , не менее	TI , % не более	\bar{E}_h , лк, не менее	U_h , не менее
А	A1	2,0	0,4	0,7	10	30	0,35
	A2	1,6				20	
	A3	1,4					
	A4	1,2					
Б	B1	1,2		0,6	15	15	0,25
	B2	1,0					
В	B1	0,8		0,5	15	10	0,25
	B2	0,6				6	
	B3	0,4	0,35			0,4	

Примечание – Значения \bar{L} , U_0 , U_1 и TI должны быть обеспечены на всей проезжей части при расположении водителя на любой полосе движения.

Приложение Б. Массивы рассчитанных нормативных параметров.

Шаг расчётной сетки = 0,01 м.

E_{hij} , лк	1	2	3	4	5	6	7	8	\bar{E}_{hi}
1	10,75	12,24	18,31	17,19	17,40	20,06	20,00	20,52	17,06
2	10,47	12,82	20,42	19,29	18,66	19,60	20,62	22,87	18,09
3	11,09	12,70	19,74	19,24	18,24	19,54	21,37	22,03	17,99
4	9,99	12,71	18,61	18,34	20,25	20,13	21,16	22,61	17,97
5	10,53	12,17	18,62	16,20	17,31	19,42	20,36	22,35	17,12
6	10,68	12,21	18,16	17,51	17,97	19,96	20,62	22,46	17,45
7	10,44	12,33	17,96	16,92	17,56	19,08	20,07	22,19	17,07
8	10,37	12,43	18,55	16,88	17,88	19,64	20,67	21,78	17,27
9	10,43	12,55	17,89	17,39	17,76	19,49	20,25	21,96	17,21
\bar{E}_{hj}	10,53	12,46	18,69	17,66	18,11	19,66	20,57	22,08	17,47

U_{hij}	1	2	3	4	5	6	7	8	\bar{U}_{hi}
1	0,31	0,44	0,65	0,61	0,68	0,63	0,61	0,70	0,58
2	0,32	0,41	0,58	0,59	0,63	0,67	0,66	0,59	0,56
3	0,30	0,41	0,59	0,58	0,64	0,68	0,65	0,64	0,56
4	0,35	0,42	0,67	0,61	0,67	0,65	0,63	0,60	0,58
5	0,32	0,42	0,65	0,63	0,65	0,65	0,64	0,58	0,57
6	0,31	0,42	0,65	0,60	0,65	0,66	0,62	0,59	0,56
7	0,31	0,41	0,68	0,62	0,65	0,67	0,69	0,59	0,58

8	0,32	0,41	0,65	0,63	0,66	0,68	0,67	0,62	0,58
9	0,32	0,40	0,67	0,58	0,61	0,66	0,64	0,61	0,56
$\overline{U_{hj}}$	0,32	0,42	0,64	0,60	0,65	0,66	0,65	0,61	0,57

E_{nij} , лк	1	2	3	4	5	6	7	8	$\overline{E_{hu}}$
1	10,86	12,13	18,57	16,63	18,02	19,79	20,05	21,40	17,18
2	10,61	12,67	20,68	19,29	18,66	19,78	20,98	22,84	18,19
3	10,90	12,75	20,74	18,68	18,23	19,37	21,37	23,04	18,13
4	10,29	12,53	18,64	18,34	20,25	20,09	21,04	23,04	18,03
5	10,63	12,09	18,56	16,43	17,61	19,45	20,36	22,35	17,18
6	10,79	12,06	18,81	17,07	18,02	20,00	20,59	22,76	17,51
7	10,54	12,15	18,42	16,57	17,55	19,00	20,53	22,13	17,11
8	10,53	12,29	18,41	16,90	17,97	19,69	20,54	22,54	17,36
9	10,53	12,33	18,13	16,96	17,76	19,41	20,42	22,35	17,24
$\overline{E_{hj}}$	10,63	12,33	19,00	17,43	18,23	19,62	20,65	22,49	17,55

Шаг расчётной сетки соответствует нормативным документам.

U_{nij}	1	2	3	4	5	6	7	8	$\overline{E_{hu}}$
1	0,30	0,45	0,64	0,63	0,66	0,64	0,61	0,67	0,57
2	0,32	0,42	0,57	0,59	0,63	0,66	0,65	0,59	0,55
3	0,31	0,40	0,57	0,59	0,64	0,68	0,65	0,61	0,56
4	0,33	0,43	0,67	0,61	0,67	0,66	0,63	0,59	0,57
5	0,32	0,43	0,65	0,62	0,64	0,65	0,64	0,58	0,57
6	0,30	0,43	0,62	0,61	0,65	0,66	0,62	0,58	0,56
7	0,31	0,42	0,67	0,63	0,65	0,67	0,68	0,59	0,58
8	0,32	0,42	0,65	0,63	0,66	0,68	0,67	0,60	0,58
9	0,31	0,41	0,66	0,60	0,61	0,66	0,64	0,59	0,56
$\overline{U_{hj}}$	0,31	0,42	0,63	0,61	0,65	0,66	0,64	0,60	0,57

Интегральная равномерность освещенности при $k = 1.64$;

U_{nij}	1	2	3	4	5	6	7	8	$\overline{E_{hu}}$
1	0,20	0,43	0,60	0,56	0,65	0,60	0,61	0,63	0,53
2	0,22	0,40	0,51	0,57	0,60	0,64	0,63	0,58	0,52

3	0,18	0,43	0,56	0,52	0,63	0,65	0,62	0,63	0,53
4	0,21	0,41	0,60	0,56	0,68	0,67	0,65	0,59	0,55
5	0,22	0,43	0,57	0,57	0,62	0,62	0,64	0,57	0,53
6	0,21	0,42	0,60	0,57	0,64	0,62	0,63	0,57	0,53
7	0,21	0,44	0,60	0,58	0,63	0,65	0,68	0,57	0,55
8	0,21	0,43	0,57	0,57	0,64	0,66	0,67	0,58	0,54
9	0,20	0,41	0,65	0,57	0,61	0,61	0,64	0,59	0,53
$\overline{U_{hj}}$	0,21	0,42	0,58	0,56	0,63	0,64	0,64	0,59	0,53

Интегральная равномерность освещенности при $k = 1.28$;

U_{hij}	1	2	3	4	5	6	7	8	$\overline{E_{hi}}$
1	0,37	0,55	0,69	0,66	0,73	0,68	0,69	0,71	0,64
2	0,39	0,54	0,62	0,66	0,69	0,72	0,71	0,67	0,62
3	0,36	0,56	0,65	0,62	0,71	0,73	0,70	0,71	0,63
4	0,38	0,54	0,69	0,66	0,75	0,74	0,73	0,68	0,65
5	0,39	0,56	0,66	0,67	0,70	0,70	0,72	0,66	0,63
6	0,38	0,54	0,69	0,66	0,72	0,71	0,71	0,67	0,64
7	0,38	0,56	0,69	0,68	0,71	0,72	0,75	0,67	0,65
8	0,38	0,55	0,67	0,67	0,72	0,74	0,75	0,67	0,64
9	0,38	0,54	0,72	0,66	0,70	0,70	0,72	0,68	0,64
$\overline{U_{hj}}$	0,38	0,55	0,68	0,66	0,71	0,72	0,72	0,68	0,64