

УДК 621.311.243:628.9

Терентьев Павел Валерьевич

к.т.н., доцент кафедры «ПМФиВМ»

Нижегородский государственный

агротехнологический университет

им. Флорентьева Л.Я.

Terentyev Pavel Valerievich

Мошков Александр Сергеевич, магистрант

Нижегородский государственный

агротехнологический университет

им. Флорентьева Л.Я.

Moshkov Alexander Sergeevich

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ
АВТОНОМНОЙ СВЕТОДИОДНОЙ СИСТЕМЫ НАРУЖНОГО ОСВЕЩЕНИЯ
НА ОСНОВЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ УСЛОВИЙ УМЕРЕННОГО КЛИМАТА
EXPERIMENTAL SUBSTANTIATION OF THE PARAMETERS
OF AN AUTONOMOUS LED OUTDOOR LIGHTING SYSTEM BASED
ON SOLAR ENERGY FOR TEMPERATE CLIMATE CONDITIONS**

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментальных исследований, направленных на оптимизацию компонентов автономной системы наружного освещения для сельских территорий в условиях умеренного климата (на примере Нижегородской области). Исследовано влияние отклонений питающего напряжения на тепловые и светотехнические характеристики современных светодиодных светильников. Проведен сравнительный анализ эффективности монокристаллических и поликристаллических фотоэлектрических модулей (ФСМ) в зависимости от температуры, угла наклона и уровня инсоляции. На основе полученных данных разработана структура автономной системы, включающая MPPT-контроллеры и литий-железо-фосфатные (LiFePO_4) аккумуляторные батареи. Предложена методика расчета энергетического баланса, учитывающая климатические особенности региона. Показана экономическая целесообразность применения таких систем на объектах, удаленных от централизованных сетей на расстояние более 3 км.

Abstract. This article presents the results of experimental studies aimed at optimizing the components of an autonomous outdoor lighting system for rural areas with a temperate climate (using the Nizhny Novgorod region as an example). The effect of supply voltage fluctuations on the thermal and lighting characteristics of modern LED luminaires is investigated. A comparative analysis of the efficiency of monocrystalline and polycrystalline photovoltaic modules (PVMs) is conducted depending on temperature, tilt angle, and insolation level. Based on the obtained data, the structure of an autonomous system, including MPPT controllers and lithium-iron phosphate (LiFePO_4) batteries, is developed. An energy balance calculation method is proposed that takes into account the climatic features of the region. The economic feasibility of using such systems at sites located more than 3 km from centralized grids is demonstrated.



Ключевые слова: Автономное освещение, светодиодные светильники, солнечная энергия, фотоэлектрические модули, MPPT-контроллер, литий-железо-фосфатные аккумуляторы, энергоэффективность.

Keywords: Autonomous lighting, LED lamps, solar energy, photovoltaic modules, MPPT controller, lithium iron phosphate batteries, energy efficiency.

Введение

Одной из актуальных задач для сельских и удаленных территорий является обеспечение надежного и экономичного наружного освещения. Высокая стоимость строительства линий электропередачи (ЛЭП) и эксплуатационные расходы делают автономные системы на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) привлекательной альтернативой [1-3]. Однако эффективность таких систем критически зависит от правильного выбора компонентов, которые должны быть адаптированы к конкретным климатическим условиям. В связи с этим целью работы является экспериментальное обоснование параметров автономной светодиодной системы наружного освещения, ориентированной на условия умеренного климата (на примере Нижегородской области).

Материалы и методы исследования

Исследования проводились в лабораториях кафедры «ПМФиВМ» НГТУ. Объектами исследования являлись:

Светодиодные светильники наружного освещения трех типов (мощностью 80-100 Вт, с питанием от сети 230 В AC и от источника 24 В DC). Испытания проводились при вариации питающего напряжения от 207 до 253 В. Фиксировались электрические параметры (анализатор качества AR5-L), температура корпуса и матрицы (тепловизор Fluke Ti32, контактные термометры), освещенность и коэффициент пульсации (люксметр-пульсметр ТКА-ПКМ).

Фотоэлектрические модули монокристаллического (МК) и поликристаллического (ПК) типов мощностью по 30 Вт. Исследовалось влияние температуры нагрева, угла наклона (от 60° до 90°) и уровня инсоляции (от 200 до 550 Вт/м²) на их вольт-амперные и мощностные характеристики.

Результаты и их обсуждение

1. Исследование светодиодных светильников

Эксперименты подтвердили высокую стабильность работы современных светодиодных драйверов. При колебаниях питающего напряжения в диапазоне $\pm 10\%$ от номинала активная мощность всех исследуемых образцов оставалась практически неизменной (отклонение не более 2-3%). Это свидетельствует об эффективной стабилизации выходного тока и светового потока [4-6].

Температурные исследования показали, что нагрев светодиодной матрицы во всех режимах не превышает 50°C (рис. 1), что значительно ниже критических значений (85-105°C) и гарантирует заявленный ресурс светильников. Повышение напряжения с 230 В до 253 В приводит к росту температуры на 1-2°C, что не является критичным.



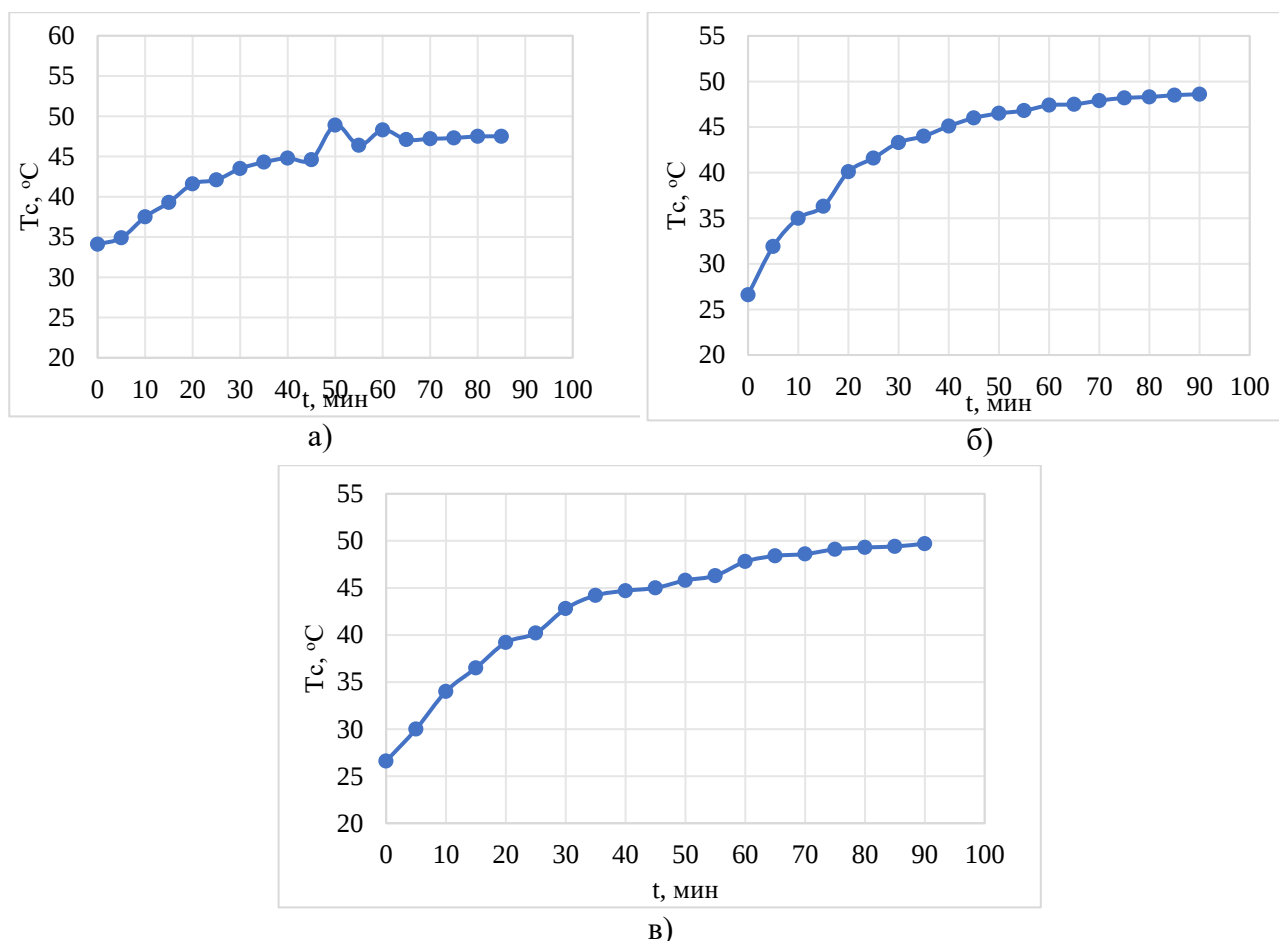


Рисунок 1 – Зависимость температуры светодиодной матрицы от времени при разных уровнях питающего напряжения: а) $U = 207$ В, б) $U = 230$ В, в) $U = 253$ В

Ключевым выводом для проектирования стало предпочтение светильников с питанием 24 В DC (табл. 1). Их применение позволяет исключить из системы инвертор, что повышает общий КПД на 10-15% и снижает капитальные затраты на стоимость инвертора.

Таблица 1

Сравнительный анализ исследованных светодиодных светильников

Параметр сравнения	Светодиодный светильник 80Вт АС	Светодиодный светильник 100Вт АС	Светодиодный светильник 80Вт DC
Стабильность активной мощности при $\Delta U = \pm 10\%$	Высокая (отклонение $< 3\%$)	Высокая (отклонение $< 2\%$)	Высокая (отклонение $< 3\%$)
Коэффициент мощности ($\cos\phi$) при 230 В	0,96-0,97	0,98-0,99	0,95 (DC)
THDi при 230 В, %	16-21	3,4-3,9	Не применяется
Установившаяся температура матрицы, °C	48-49	45-47	42-44
Зависимость температуры от напряжения	Умеренная (2-3°C)	Слабая (1-2°C)	Слабая (1-1,5°C)
Коэффициент пульсации, %	4,3-6,4	8,2-8,6	5-7
Необходимость инвертора для работы от АКБ	Да	Да	Нет
Ориентировочная стоимость, руб	4500-5500	5800-6500	7800-8500



2. Исследование фотоэлектрических модулей [7-9].

Сравнительный анализ МК и ПК модулей выявил следующие закономерности:

Температурная зависимость: МК-модуль показал меньшую чувствительность к нагреву. При повышении температуры с $28,5^{\circ}\text{C}$ до 54°C его мощность снизилась незначительно, в то время как мощность ПК-модуля при нагреве с 44°C до 58°C упала почти на 8% (рис. 2).

Зависимость от инсоляции: Оба типа модулей демонстрируют линейную зависимость выходной мощности от уровня инсоляции. Однако МК-модуль сохраняет работоспособность и генерирует ток при более низких уровнях освещенности (вплоть до 250 Вт/м^2), тогда как ПК-модуль перестает генерировать ток уже при 300 Вт/м^2 .

Оптимальный угол наклона: Для условий Нижегородской области, особенно в зимний период, когда потребление энергии на освещение максимально, оптимальным является угол наклона ФСМ в диапазоне $60\text{--}70^{\circ}$ от горизонта. Это обеспечивает максимальный улов низкого зимнего солнца и способствует самоочищению модулей от снега.

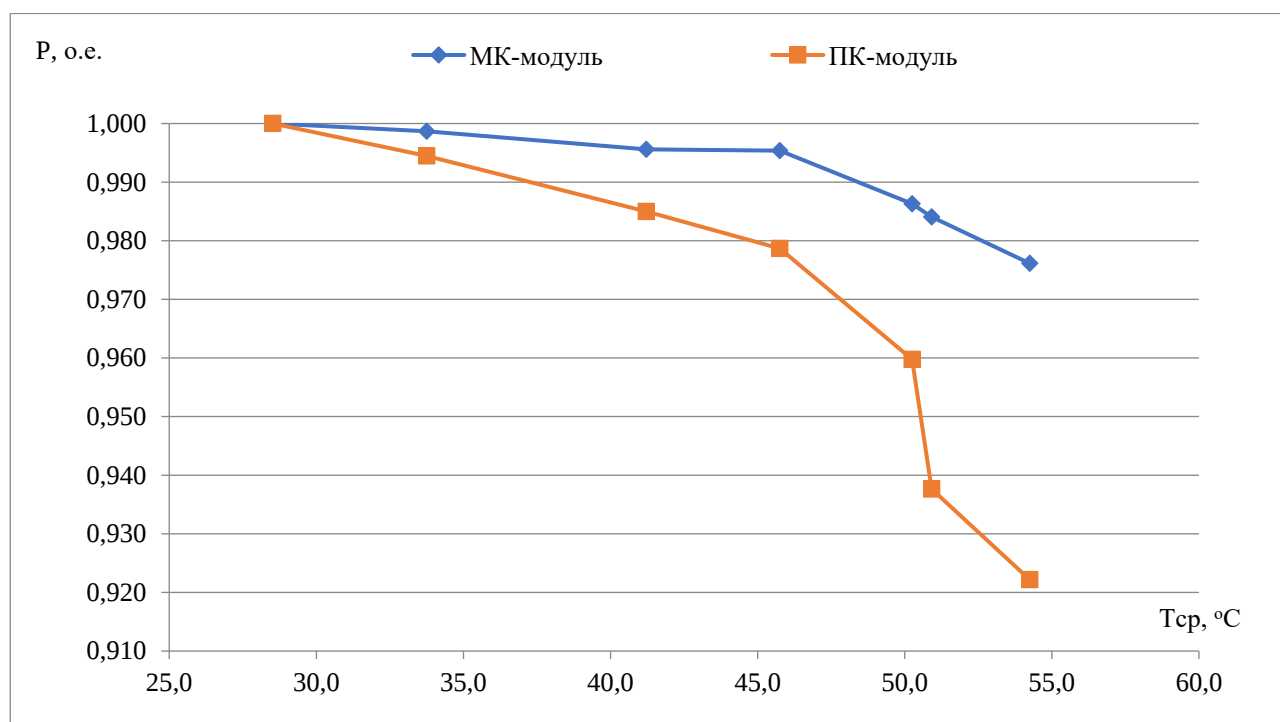


Рисунок 2 – Сравнение изменения выходной мощности монокристаллического и поликристаллического модулей при нагреве

3. Разработка системы и выбор компонентов

На основе полученных экспериментальных данных была спроектирована автономная система для освещения участка дороги протяженностью 200 м (рис. 3) [10]. Светотехнический расчет, выполненный согласно ГОСТ Р 55706-2023 [11], показал необходимость установки 8 светильников ($7 \times 80 \text{ Вт}$ и $1 \times 100 \text{ Вт}$) с общим суточным энергопотреблением $7,26 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$.

Для обеспечения круглогодичной работы с учетом минимальной декадной инсоляции ($1,09 \text{ кВт} \cdot \text{ч/м}^2$ в декабре) был произведен расчет энергобаланса [12]. В результате выбрана следующая конфигурация:

ФСМ: 20 монокристаллических модулей суммарной пиковой мощностью $11,0 \text{ кВт}$.

Аккумуляторные батареи: 10 литий-железо-фосфатных (LiFePO_4) батарей (12 В , $200 \text{ А} \cdot \text{ч}$), образующих банк 24 В , $2000 \text{ А} \cdot \text{ч}$. Запасенной энергии достаточно для 4 суток автономной работы в зимний период.

Контроллер: 4 МРРТ-контроллера (по 100 А), обеспечивающих максимальный отбор мощности от ФСМ в условиях переменной облачности.



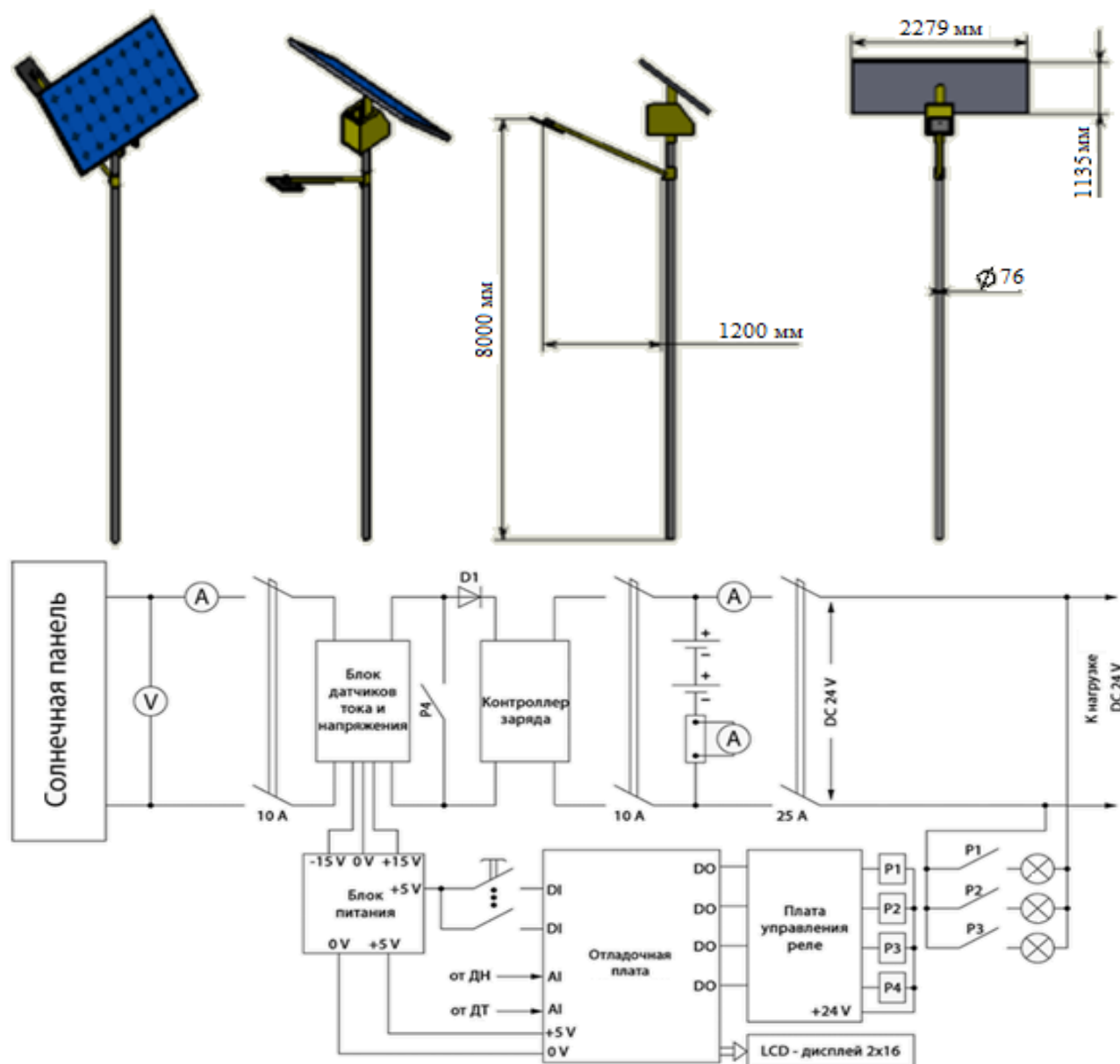


Рисунок 3 – Структурная и принципиальная электрическая схема автономной осветительной установки

4. Экономическая эффективность

Расчет совокупной стоимости владения (ТСО) за 15 лет показал, что, несмотря на более высокие первоначальные капитальные затраты (2,62 млн руб. против 0,67 млн руб. для подключения к ЛЭП), автономная система становится экономически целесообразной при удаленности объекта от сетей более 2,7-3 км. Это делает ее оптимальным решением для отдаленных ферм, полевых станов и других сельскохозяйственных объектов.

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования позволили научно обосновать выбор ключевых компонентов автономной системы наружного освещения для условий умеренного климата. Установлены преимущества использования светильников с питанием 24 В DC и монокристаллических фотоэлектрических модулей, которые обеспечивают более высокую эффективность и надежность системы в зимний период. Предложенная методика расчета и структура системы могут быть рекомендованы для внедрения на удаленных сельских территориях, где она обеспечивает энергетическую независимость и экономическую выгоду в долгосрочной перспективе

Список литературы:

1. Фортов В.Е., Попель О.С. Возобновляемая энергетика в современном Мире. Учебное пособие. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 450 с.
2. Терентьев П.В., Чертилов Д.А., Абрамов Н.В., Кибонги А.П., Перспективы развития солнечной энергетики в Российской Федерации //Флагман науки: научный журнал. Ноябрь 2025.-СПб., Изд.ГНИИ "Нацразвитие"-2025. №11 (34).
3. Зиновьев В.В., Бартенев О.А. Автономные управляемые солнечно-ветровые уличные светильники для условий России // Управление техносферой: электрон. журнал, 2020. Т.3. Вып.1. URL: <http://f-ing.udsu.ru/technosphere>.
4. Терентьев П.В., Щербаков В.С., Исследование современных источников наружного освещения //Флагман науки: научный журнал. Декабрь 2024.-СПб., Изд.ГНИИ "Нацразвитие"-2024. №12 (23).
5. Терентьев П.В., Сулимов Д.М., Зуев А.С., Сравнительный анализ эксплуатационных характеристик светильников наружного освещения для сельских населенных пунктов в условиях отклонений напряжения //Флагман науки: научный журнал. Ноябрь 2025.-СПб., Изд.ГНИИ "Нацразвитие"-2025. №11 (34).
6. Терентьев П. В. Исследование временной динамики установления рабочих характеристик светодиодных светильников наружного освещения при различных уровнях питающего напряжения / П. В. Терентьев, А. С. Зуев // Научные решения и изобретения: теория и эксперимент: монография / под общ. ред. научного совета ГНИИ «Нацразвитие». – СПб: ГНИИ «Нацразвитие», 2026. – С. 83–88.
7. Шильников, С. В. Разработка лабораторного стенда по исследованию ФСМ / С. В. Шильников, П. В. Терентьев // XXVII Нижегородская сессия молодых ученых: технические, естественные, математические науки: материалы сессии, Нижний Новгород, 24–27 мая 2022 г. – Москва: Перо, 2022. – С. 130–135.
8. Терентьев П.В., Чертилов Д.А., Мошков А.С., Кибонги А.П., Тепловизионное инспектирование фотоэлектрических солнечных модулей в реальных условиях эксплуатации //Флагман науки: научный журнал. Октябрь 2025.-СПб., Изд.ГНИИ "Нацразвитие"-2025. №10 (33).
9. Терентьев П.В., Лупов А.К., Термоэлектрическая стабильность фотоэлектрических модулей: сравнительный анализ моно- и поликристаллических структур при температурных воздействиях // Вектор научной мысли: научный журнал. Февраль 2026.-СПб., Изд.МИПИ им. Ломоносова -2026. №2 (31).
10. Горбунов А. А. Оптимизация режимов работы фотоэлектрической установки: реферат по теме выпускной работы / А. А. Горбунов; науч. рук. В. Г. Черников; Донецкий национальный технический университет, Электротехнический факультет, Кафедра систем программного управления и мехатроника. – Донецк, 2019. – URL: <https://masters.donntu.ru/2019/etf/gorbunov/diss/index.htm>.
11. ГОСТ Р 55706-2023. Освещение наружное утилитарное. Классификация и нормы. – Введ. 2023-10-01. – М.: Стандартинформ, 2023. – 15 с.
12. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Расчет фотоэлектрических систем: Методические указания к практическим занятиям / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: С.Е. Лозовский, Д.А. Устинов. СПб, 2023. – 32 с

