

УДК 004.021

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА АВТОМАТИЗАЦИИ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНОЙ РАССТАНОВКИ ИСТОЧНИКОВ ОСВЕЩЕНИЯ В ГОРОДСКОЙ СРЕДЕ

А.В. Сендер^а, А.В. Шиян^а, А.В. Чиркина^б, А.М. Чиркин^с, Д.И. Муромцев^а

^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

^б InCube AG, Цюрих, 8002, Швейцария

^с ETH Zurich, Цюрих, CH-8093, Швейцария

Адрес для переписки: mouromtsev@mail.ifmo.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 27.11.17, принята к печати 29.12.17

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-1-122-132

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Сендер А.В., Шиян А.В., Чиркина А.В., Чиркин А.М., Муромцев Д.И. Разработка алгоритма автоматизации поиска оптимальной расстановки источников освещения в городской среде // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 1. С. 122–132. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-1-122-132

Аннотация

Представлены результаты исследования по выбору оптимальных точек установки освещения в городской среде при использовании потенциала геометрии пространства. Объектом исследования данной работы является квартал как локальная городская территория. В процессе анализа геометрии квартала рассчитываются необходимое количество источников освещения и их положение при заданных характеристиках источников. Предлагаемый алгоритм основан на понятии изовиста из теории пространственного синтаксиса и состоит из двух этапов: построение карты видимости и оптимальная расстановка источников освещения. Результатом работы алгоритма являются матрица освещенности при оптимальной расстановке источников освещения и список их координат. Предложенный подход оценен на примере двух вариантов пространственного анализа взаимосвязи между планировкой территории, видимостью и точками источников освещения. Алгоритм, представленный в статье, может иметь широкое применение на стадии проектирования схематического городского освещения. В частности, он может быть использован на ранних этапах проектирования для оценки потенциала проекта.

Ключевые слова

планирование городского района, дизайн городского пространства, расчет освещенности, теории пространственного синтаксиса

Благодарности

Работа является частью исследовательского проекта ADvISE (Data analysis for understanding the impact of urban design on social performance of a city, «Анализ данных для понимания влияния дизайна городского пространства на социальные показатели города», проект Высшей технической школы Цюриха). Работа частично поддержана грантом РГНФ 16-23-41007.

AN ALGORITHM FOR SEARCH AUTOMATION OF LIGHTING SOURCES OPTIMAL ARRANGEMENT IN URBAN ENVIRONMENT

A.V. Sender^а, A.V. Shiyan^а, A.V. Chirkina^б, A.M. Chirkin^с, D.I. Mouromtsev^а

^а ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

^б InCube AG, Zurich, 8002, Switzerland

^с ETH Zurich, Цюрих, CH-8093, Switzerland

Corresponding author: mouromtsev@mail.ifmo.ru

Article info

Received 27.11.17, accepted 29.12.17

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-1-122-132

Article in Russian

For citation: Sender A.V., Shiyan A.V., Chirkina A.V., Chirkin A.M., Mouromtsev D.I. An algorithm for search automation of lighting sources optimal arrangement in urban environment. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 122–132 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-1-122-132

Abstract

The paper presents research results on the optimal lighting arrangement using the potential of space and geometry in an urban environment. A local urban area such as a city block is selected as an object of research. In the process of the block geometry analysis the required number of light sources and their position with the given characteristics of the sources are

calculated. The proposed algorithm is based on the concept of the isovist from the theory of spatial syntax and consists of two stages: visibility map creation and the optimal arrangement of lighting sources. The result of the algorithm operation is an illumination matrix with the optimal arrangement of light sources and a list of their coordinates. The presented algorithm can be used to estimate an urban light demand. The algorithm presented in the paper can be used for design of schematic urban lighting. In particular, it can be used in the early stages of design to assess the project's potential.

Keywords

|Urban planning, urban design, illumination planning, Space Syntax theories

Acknowledgements

This paper is a part of the research project ADvISE (Data analysis for understanding the impact of urban space design on the social indicators of the city, the project of the Higher Technical School of Zurich). The work is partially supported by the RGNF grant No. 16-23-41007.

Введение

Одним из ключевых критериев комфортности городской среды является освещение, обеспечивающее видимость локальной области городской территории. Повышая безопасность и доступность городской среды, освещение дает возможность лучше ориентироваться в пространстве и визуально связывать его структурные компоненты. Кроме функционального назначения, освещение используется и для создания визуальных акцентов, красивых элементов городской среды, в том числе и дворовых пространств жилой застройки.

Объект исследования данной работы – квартал, как локальная территория города, для которого и рассмотрен комплексный анализ освещенности. Стандартные кварталы планируются исходя из максимальной плотности прилегающих друг к другу разных зон активности жителей. Соответственно, существенно возрастает вероятность нерационального планирования внутриквартальных пространств. При рациональном планировании городской территории возможна оптимизация ряда характеристик освещения, в том числе количество точек освещения и ландшафтная покрываемость.

Целью данного исследования является выбор оптимальных точек установки источников освещения с использованием потенциала геометрии пространства. В данной работе при анализе освещенности принят ряд допущений: используется только один тип источников освещения, не учитываются вторичные эффекты (отражение и рассеяние света поверхностями), рассматривается двумерная проекция геометрии (считается, что все здания – выше фонарей). В результате предложенный алгоритм не дает точной оценки освещенности, но позволяет очень быстро рассчитать примерный потенциал освещения и проблемные зоны квартала.

Актуальность вопроса

При планировании городской среды специалисты разного профиля, прежде всего архитекторы-проектировщики, сталкиваются с рутинными процессами и ограниченностью масштаба в рамках текущих инструментов моделирования. Введение автоматической поддержки эскизного проектирования позволяет вести его с разной степенью детализации, с учетом слоев ландшафта и инфраструктуры, тем самым упрощая и ускоряя процесс планирования городской ткани квартала. Особый практический и научный интерес представляет опыт комплексного благоустройства жилых территорий кварталов, прежде всего дворов, что связано с высоким удельным весом дворов как объекта исследования в общей площади города [1]. Комплексно благоустроенный двор должен иметь конфигурацию, максимально отвечающую функциональным, эксплуатационным, экологическим и эстетическим требованиям, в том числе требованиям по обеспечению инсоляции, освещения и противопожарных разрывов между зданиями.

Принципы планирования источников освещения в городах. Искусственное освещение изначально воспринималось только с точки зрения утилитарной функции. Однако с течением времени стал рассматриваться комплексный подход с формированием разнообразных концепций городской среды.

Критерии освещенности строятся на общепринятых характеристиках [2]:

- A. Видимость – главный критерий, обеспечение зоны комфортного обзора, необходимый уровень количественных и качественных параметров освещения;
- B. Безопасность – общественный порядок, личная безопасность напрямую зависит от качества освещения пешеходных дорожек, дворовых пространств, детских площадок;
- C. Эстетика – не только функциональное, но и гармоничное световое окружение;
- D. Экономика – прагматичный подход с использованием технологий для организации грамотного освещения;
- E. Социальная жизнь – положительная роль освещения для создания более активной и открытой жизни жителей, перманентной общественной деятельности города (ночная), туризм, торговля, занятия спортом и т.д.

Предпосылки возникновения стандартов освещения. С момента появления первого способа освещения окружающего пространства прошло много времени. Человечество прошло через целые эпохи эволюции, от простых костров до современных светодиодных ламп, продолжая разрабатывать иннова-

ционные технологии [3]. При расчете требуемого уровня освещенности для конкретного пространства очень важно, чтобы этот уровень определялся целесообразностью в освещении территории. Стандартный подход рассматривает полностью равномерное освещение по всей площади территории, без учета его функциональных особенностей. Чтобы не освещать всю площадь на самом высоком уровне, можно снизить общий уровень освещения за счет организации дополнительного освещения на отдельных участках там, где это требуется. В результате получается более эргономичный, оптимизированный проект освещения. Исходя из этого, формируется потребность проверки освещенности в расчетных точках осветительных установок [4].

Критерий освещенности и его значимость для городского пространства

Обеспечение светового комфорта достигается за счет рационально выбранных количественных и качественных характеристик освещения, которые контролируются нормами освещения [5]. В процессе архитектурного проектирования и выбора систем освещения выделяют два этапа. На первом, в соответствии с нормами, выбирают необходимые уровни освещенности с учетом особенностей работы человеческого глаза; выбирают расположение световых проемов, осветительных приборов в контексте городской среды. На втором этапе проектирования создают архитектурный световой образ [6].

В целях создания комфортной световой среды планирование городского освещения должно подчиняться требованиям энергосбережения и основываться на комплексном подходе – привлечении к проектированию освещения, наряду с инженерами, архитекторов и дизайнеров [7].

Типы функций пространства и уровни освещения. При разработке концепции освещения учитываются масштабы города, главными структурными элементами которого являются функциональные зоны, а структурно-формирующими системами – система транспортных магистралей, система общественных центров, система озеленения и т.д. [8].

Функциональные зоны подразделяются на жилые, общественно-деловые, производственные, рекреационные/парковые, транспортную инфраструктуру.

В практике освещения городов выработано несколько приемов наиболее рационального размещения светильников на улице. Наиболее распространенный прием – размещение вдоль центральной оси улицы с установкой на опорах или с подвеской на тросах. Освещение внутреннего пространства улиц в городских микрорайонах организуется по нормам светильниками прямого света. Для освещения общественных пространств и ландшафтных зон города используют светильники рассеянного света. Наружное освещение городской инфраструктуры обеспечивается согласно нормативам с использованием светильников, располагаемых на опорах. Требования к освещенности различных объектов регулируются СНиП 23-05-2010¹. Расстояние между соседними столбами (светильниками) называется пролетом, нормы и правила их размещения прописаны в регламентирующей документации (ГОСТ, СНиП). В настоящее время действует Федеральный документ СНиП 23-05-95² «Естественное и искусственное уличное освещение», введенный в действие в 1996 г.

Расчет освещенности при планировке квартала

Общая форма объектов застройки территории, например, их геометрия и объем, существенно влияет на освещенность внутриквартального пространства [9]. Соотношение площади здания с площадью дворовой территории также является фактором влияния на видимость и проницаемость при комплексном проектировании освещения территории. Проникновение света существенным образом увеличивает область охвата одной осветительной установки, что, в свою очередь, позволяет гибко проектировать сеть осветительных установок в рамках разрабатываемой концепции освещения территории.

Существуют следующие методы (автоматического и не только) расчета освещенности:

- точечный метод, в котором главными исходными параметрами являются сила света излучателя или его элемента в направлении расчетной точки, его положение относительно этой точки и ориентация плоскости, в которой рассчитывается освещенность;
- метод коэффициента использования светового потока, в котором средняя освещенность определяется как отношение светового потока, установившегося на расчетной плоскости, к площади этой поверхности. Метод коэффициента использования применяется обычно при решении прямой задачи, когда распределение светового потока по освещаемой поверхности близко к равномерному. Поверхностные расчеты освещенности выполняются, как правило, методом точечного расчета [10].

В основе всех методов расчета освещенности (рис. 1) от точечных световых элементов лежит закон квадрата расстояния: освещенность от точечного излучателя в точке A равна силе света I в направлении от источника к расчетной точке, умноженной на косинус угла между направлением от источника к

¹ <http://komled.com/images/doc/snip-23-05-2010.pdf>

² <http://docs.cntd.ru/document/456054197>

расчетной точке и перпендикуляром к освещаемой плоскости и деленной на квадрат расстояния от источника до расчетной точки, т.е.

$$E_A = \frac{I_\alpha \cos \beta_\Gamma}{r^2}. \quad (1)$$

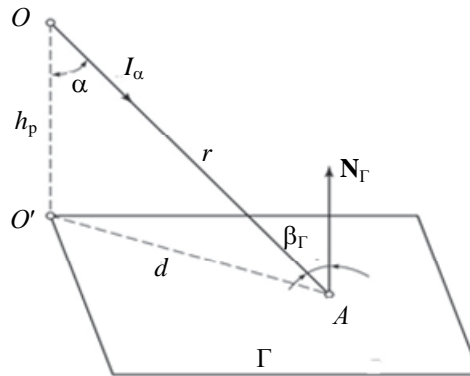


Рис. 1. Расчет освещенности от точечного источника света: N_Γ – вектор нормали плоскости Γ ; β_Γ – угол между направлением силы света в расчетную точку A и вектором нормали N_Γ ; r – расстояние от светильника O до расчетной точки A ; h_p – высота подвеса светильника над расчетной плоскостью; O' – проекция позиции светильника O на поверхность Γ параллельно вектору N_Γ ; d – расстояние от O' до A

При расчете освещенности по методу коэффициента использования осветительной установки с учетом многократных отражений суммарная освещенность на расчетной плоскости E_p в общем виде представляет собой сумму двух слагаемых:

$$E_p = E_{пр} + E_{отр},$$

где $E_{пр}$ – освещенность, создаваемая прямым световым потоком (прямая составляющая освещенности); $E_{отр}$ – освещенность, создаваемая световым потоком, многократно отраженным от поверхностей помещения (отраженная составляющая освещенности).

Существующие теоретические исследования. Теория пространственного синтаксиса основана на том, что любое городское пространство может быть представлено в виде матрицы соединенных пространств, а математические свойства этой матрицы можно измерить с помощью компьютерного моделирования. Новая методология проектирования количественного планирования уличного освещения, применяя теорию пространственного синтаксиса, позволяет формировать структуру стратегического проектирования на основе детального анализа пространственной конфигурации. В работе [11] предложена методика стратегического проектирования уличного освещения на основе результатов модели пространственного синтаксиса, в частности, на уровне пешеходного движения. В качестве примера анализируется взаимосвязь между наблюдаемой скоростью движения пешеходов и измеренными значениями освещенности конкретного района Сеула, Корея, после чего предлагается новый план количественного размещения уличного освещения [12]. Однако обе работы предполагают анализ графов видимости и расстановку источников освещения вручную, что требует глубокого знания предмета и значительных трудозатрат.

Критерий освещенности. Для автоматизации процесса расстановки источников освещения необходимо задать критерий останова алгоритма. Естественным критерием выполнения алгоритма является требование необходимого уровня освещения в каждой точке открытого пространства проекта. С другой стороны, при учете ошибок векторного представления геометрии, дискретизации пространства и особенностей анализируемого проекта это требование часто становится невыполнимым. Исходя из этого, в данной работе мы предлагаем следующий, более гибкий критерий освещенности:

Мера (площадь) множества точек с уровнем освещения не ниже x должна составлять не менее $y\%$ от общей меры открытого пространства проекта.

Методы пространственного синтаксиса для расчета освещения городского квартала

Понятие комфортности освещения связано, главным образом, с обеспечением благоприятной видимости и восприятия архитектурных форм, пространства и объектов человеком, а также с задачами выполнения норм освещения [13]. В первом приближении мы рассматриваем точечные источники освещения, свет от которых распространяется равномерно по всем направлениям. В то же время городская среда с ее геометрией и изобилием препятствий в виде стен, зданий, заборов и т.д. мешает равномерному распространению света от источника. Пренебрегая светом, отраженным от препятствий, мы можем утверждать следующее: источник света освещает некую заданную точку, если этот источник можно непосредственно видеть из этой точки. Эквивалентно можно сказать, что источник света освещает те области пространства, которые видны из точки освещения с учетом геометрии городской среды [14]. Таким обра-

зом, проблема освещенности пространства сводится к проблеме видимости: источник света, помещенный в точку с максимальной видимостью (рис. 2), освещает наибольшую площадь [15].

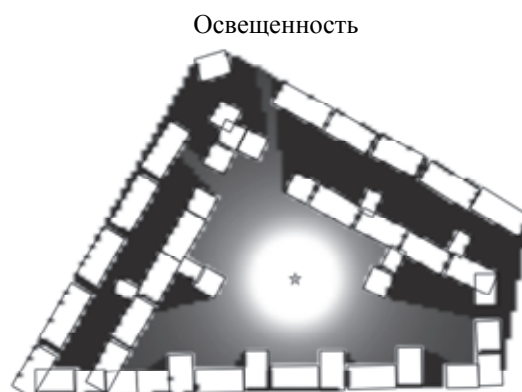


Рис. 2. Область видимости относительно точки освещения (распространение)

Логично предположить, что для нахождения точек с максимальной видимостью необходимо рассчитать видимость в каждой точке пространства. В теории пространственного синтаксиса для этого вводится понятие изовисты – области видимости из точки вместе с координатами этой точки.

Учитывая, что освещенность от точечного источника света убывает с квадратом расстояния от источника согласно формуле (1), можно конкретизировать требования к оптимальному положению источнику света:

1. источник света должен освещать заданную точку в пространстве, он должен быть видим из нее;
2. источник освещения может эффективно освещать наибольшее пространство, если область видимости в этой точке максимальна;
3. количество света от источника убывает с квадратом расстояния до этого источника.

Более строго можно сказать, что площадь покрытия источника света пропорциональна области видимости этого источника. Здесь под площадью покрытия понимается множество точек, где освещение больше минимального для данного типа местности.

Исходя из этих рассуждений, мы предполагаем, что минимизировать количество источников света при заданной минимальной необходимой освещенности можно, если располагать источники света в точках с максимальной видимостью [16].

Установив прямую зависимость между освещенностью и видимостью, мы можем разработать стратегию оптимизации освещенности. При помощи алгоритма мы одновременно определяем и оптимальные точки для источников света, и необходимое число этих источников. Для построения карты видимости можно использовать один из методов пространственного синтаксиса. Более подробно разработанный и используемый нами алгоритм описан в разделе «Описание алгоритма».

Следует принять во внимание, что городская среда неизбежно накладывает ограничения на допустимые точки размещения источников освещения: они не могут располагаться посередине дороги или тротуара, перегораживать вход в здание и так далее. Нам необходимо учесть эти ограничения и скорректировать результат работы алгоритма, например, следующим образом: если максимум видимости находится в недопустимой области (например, в центре перекрестка), выбрать в качестве результата ближайшую допустимую точку (например, на обочине) [17].

Описание алгоритма

Предложенный алгоритм реализован в виде составного сервиса для qua-kit: для построения карты видимости мы вызываем сервис *isovist-minradial* (расстояния до ближайших видимых объектов), и на основе его результатов запускаем итеративный жадный алгоритм для поиска оптимальной расстановки фонарей.

Предлагаемый алгоритм состоит из двух этапов:

1. построение карты видимости;
2. оптимальная расстановка источников освещения (фонарей).

Первый этап алгоритма выполняется вспомогательным сервисом (*isovist*). Рассмотрим второй этап алгоритма подробнее. В контексте рассматриваемой задачи мы можем понимать «видимость» точки как «необходимость освещения» для этой точки, т.е. при полном отсутствии освещения необходимость освещения максимальна для точки с наибольшей видимостью, поскольку именно эта точка обеспечит наиболее эффективное освещение.

Следует также отметить, что видимость может быть оценена разными способами. Видимость определена как область пространства, видимая из данной точки (рис. 3). Существуют различные метрики

для оценки видимости – например, площадь видимости, расстояние до самого дальнего или самого ближнего видимого объекта. Эти оценки довольно близки, но, на наш взгляд, именно расстояние до ближайшего видимого объекта подходит больше для расстановки фонарей внутри квартала или двора. Используя площадь видимой территории в качестве оценки видимости, мы в некоторой степени игнорируем геометрию квартала. Например, точка внутри узкого длинного коридора может иметь большую видимость в смысле площади, но при этом такая точка не является оптимальной для помещения в нее фонаря. С другой стороны, оценивая видимость как расстояние до ближайшей стены, мы сразу отбросим такую точку и вместо этого поставим фонарь в более равноудаленную от стен точку, что является более правильным решением с точки зрения эффективности освещения [18].

На втором этапе алгоритма необходимо определить параметр остановки, т.е. критерий оптимальности освещения. Можно предположить, что таким критерием будет обеспечение минимального уровня освещения на всей площади квартала, но такое требование будет слишком сильным и приведет к переоценке количества необходимых фонарей. В квартале могут присутствовать небольшие территории, не предназначенные для посещения, в частности, в ночное время суток. Кроме того, погрешности при численном расчете могут создавать неправильные значения на отдельных узлах сетки вблизи зданий. Таким образом, более эффективный критерий остановки алгоритма будет следующим: обеспечение минимальным освещением некоторого процента территории квартала, обычно 90–95%.

Ниже приведен псевдокод предложенного алгоритма.

Input: геометрия зданий в квартале *geom*, минимальный процент покрытия территории *min_area*, минимальный необходимый уровень освещения *min_light*;

Initialization: матрица освещения в квартале *light*, на первом шаге все ее значения равны нулю; площадь освещенной территории *lit_area* = 0; пустой список координат фонарей *light_list* = []

1. Построить карту видимости («потребности в фонаре»):

`wdist = isovist-area(geom)`

2. Расставить фонари оптимально:

`while lit_area <= min_area:`

 Найти точку максимума *wdist*:

`[i_max, j_max] = argmax(wdist)`

 Поставить в эту точку фонарь:

`light[i_max, j_max] = 1;`

`light_list.add({i_max, j_max})`

 Найти область видимости фонаря:

`iso = isovist(geom, light, i_max, j_max)`

 Обновить карту освещения в соответствии с формулой (*):

`for (i,j) in iso:`

`light[i,j] += cst*1/dist([i,j], [i_max, j_max])`

 Обновить карту потребности в фонаре:

`for (i,j) in iso:`

`if light[i,j] >= min_light:`

`wdist[i,j] = 0`

 Обновить площадь освещенной территории:

`lit_area = Count(light[i,j] > min_light) / area`

Output: конечная карта освещенности *light*, список координат фонарей *light_list*

На выход программа возвращает матрицу освещенности при оптимальной расстановке фонарей и список координат расставленных фонарей [19]. Из приведенного псевдокода несложно увидеть, что для обновления карт освещенности и потребности в фонаре алгоритм проходит все ячейки внутри области видимости фонаря. Поиск области видимости фонаря выполняется за $O(m \log m)$, где m – число полигонов в геометрии. Обновление карт видимости выполняется за $O(1/\Delta^2)$, где Δ – размер ячейки сетки, а поиск максимума на карте видимости на каждом шаге – $O(n^2)$, где n – число ячеек сетки вычислений по одной координате. Таким образом, итоговая сложность алгоритма составляет $O(n^2)$.

Реализация

Для реализации метода в виде интуитивно понятного сервиса использована сервисная архитектура *qua-kit* [20]. Таким образом, происходит интеграция на единой платформе с геометрией заданного пространства и необходимого инфраструктурного слоя по точкам освещенности территории. Следующим шагом мы определяем входные параметры:

- тип территориальной зоны (городская общественная улица, внутриквартальная улица, придомовая территория);
- минимальные параметры освещения согласно СНиП, СП и ГОСТ;
- учет максимально допустимых «темных» зон и препятствий (например из 100% территории участка можно оставить около 10–15% темных зон)
- $E = F/S$ (F – световой поток, S – площадь поверхности). Единицы измерения уровня освещенности – люксы. При этом один люкс равен одной единице светового потока (люмена) на квадратный метр ($1 \text{ лк} = 1 \text{ лм} \times 1 \text{ м}^2$);
- геометрия городского пространства;
- сила источника света;
- интенсивность потока людей (принцип приоритетности освещения) – этот параметр относится к функциональным зонам.

На первом этапе для построения карты видимости используется сервис *isovist-minradial*, вычисляющий расстояние до ближайшего объекта в каждой точке. На плоскости это значение равно длине самого короткого отрезка, проложенного от заданной точки к многоугольнику, ограничивающему видимую область (рис. 3).

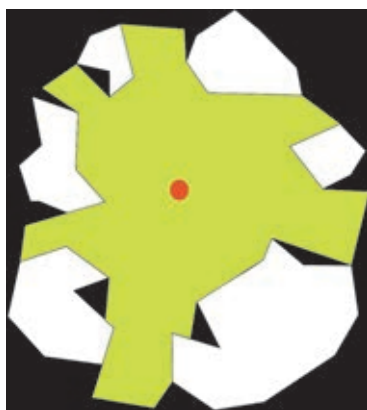


Рис. 3. Пространство, видимое из заданной точки

На втором этапе реализован итеративный алгоритм для поиска оптимальной расстановки фонарей, заключающийся в принятии локально оптимальных решений на каждом этапе, предполагая, что конечное решение также окажется оптимальным. Результат возвращается в виде набора точек (источников света) и карты искусственного освещения территории.

Обсуждение результатов

Сегодня, в связи с динамическими процессами развития городов, адаптируются и требования к повышению стандартов качества жизни на урбанизированных территориях. Значительная часть городской активности приходится на темное время суток, и, соответственно, увеличивается число субъектов, интегрирующих свои световые решения. Вследствие данной тенденции происходит рассинхронизация методов и процессов проектирования наружного освещения как неотъемлемого аспекта благоустройства городской среды [21]. Исходя из масштабности критической инфраструктуры городского пространства, автоматизированный подход к искусственному освещению должен учитывать весь спектр особенностей планирования и проектирования территории в текущей ситуации [22].

Разберем на примере двух вариантов пространственного анализа взаимосвязь между планировкой территории, аспектом видимости и точками освещения. На рис. 4, 5 представлены два варианта планировки квартала в пригороде Кейптауна, разработанные студентами онлайн-курса «Smart Cities», размещенного на платформе edX. Построение источников света и анализ освещенности, проведенные в полуинтерактивном режиме, в будущем позволят студентам и проектировщикам быстрее обнаруживать и исправлять недостатки их проектов. В данной работе анализ был проведен после того, как студенты подали последние варианты своих проектов.

При организации освещения ткань городского пространства обладает достаточными параметрами проницаемости, и барьеры, влияющие на распространения освещения, значительно снижаются (рис. 4) [23, 24].

В условиях, когда планировка территории квартала является нестандартной как с точки зрения организации внутреннего пространства, так и в формате застройки объектами, возникает сложность расположения точек освещения с условием минимального расстояния от стен или иных ландшафтных препятствий (рис. 5) [25, 26].



Рис. 4. Пример оптимальной, правильной организации освещения (несколько итераций расстановки источников освещения M): а – 0; б – 2; в – 8

Заключение

Алгоритм, представленный в настоящей работе, может иметь широкое применение на стадии проектирования схематического городского освещения. С точки зрения различных подходов в теории освещения городское пространство в дневное и ночное время практически рассматривалось одинаково. Другими словами, специалисты переносили опыт дневного образа инфраструктуры на ночное время суток без разработки новой методологии, учитывающей специфику «городской ткани». Большая часть методов освещения базируется лишь на формальных аспектах, принимая в расчет только физический слой структуры города, который трактуется как единственная опорная точка при расчете необходимого освещения. Соответственно, возникает дисбаланс – переизбыток или недостаток освещения в окружающем пространстве. В связи с этим важным методом является глубокое и всестороннее исследование проницаемости территории как фундаментального фактора освещения. Развивающаяся сеть «городской ткани» формирует новую повестку проектирования наружного освещения, отталкиваясь от типа планировочной структуры, комфорта горожан и функционирования общественных пространств. Разработанный алгоритм позволит дизайнерам минимизировать временные затраты при проектировании городского освещения и получить наглядную аналитическую картинку для предотвращения инфраструктурных ошибок. Гибкость и простота данного метода (алгоритма) в применении не отменяет необходимости в формальной оценке освещенности экспертами, но позволяет спрогнозировать потребность в источниках света на ранних этапах проектирования.

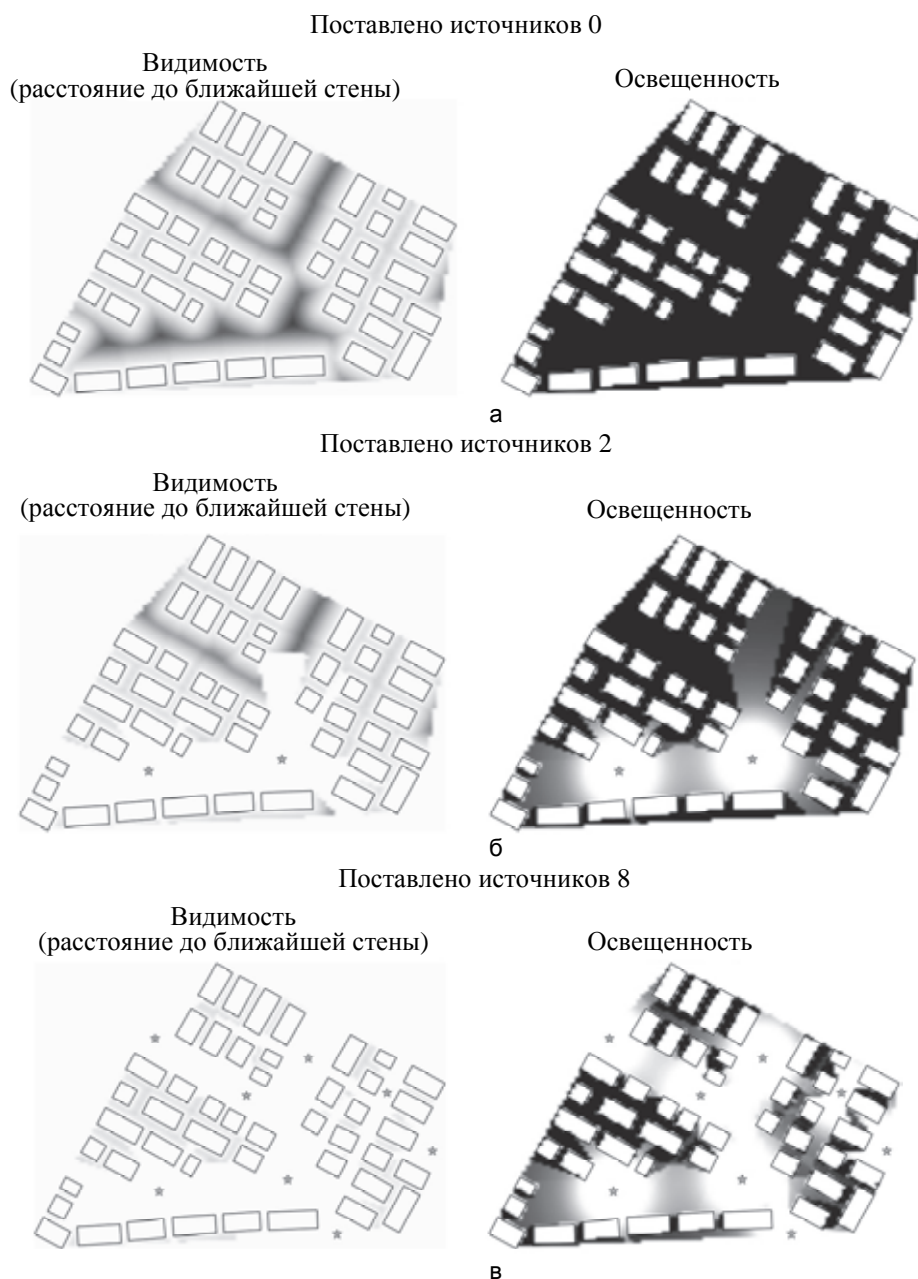


Рис. 5. Пример нерациональной организации освещения: (несколько итераций расстановки источников освещения N): а – 0; б – 2; в – 8

Литература

1. Paskovic A. *Urban Lighting: Planning for Public Spaces in Vancouver's Southeast False Creek*. Diss. Queen's University Kingston, Ontario, Canada, 2012.
2. Smitka D. *Alternatives in Light & Space: Rethinking Public Lighting in Shared Spaces*. Master Thesis. RMIT University, Melbourne, Australia, 2011. 141 p.
3. *The Lighting Handbook* [Электронный ресурс]. Zumtobel Lighting Group, 2017. Режим доступа: <http://www.zumtobel.com/PDB/teaser/RU/Lichthandbuch.pdf>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 17.12.2017).
4. Haans A., De Kort Y.A.W. Light distribution in dynamic street lighting: two experimental studies on its effects on perceived safety, prospect, concealment, and escape // *Journal of Environmental Psychology*. 2012. V. 32. N 4. P. 342–352. doi: 10.1016/j.jenvp.2012.05.006
5. Nutsford D., Reitsma F., Pearson A.L., Kingham S. Personalising the viewshed: visibility analysis from the human perspective //

References

1. Paskovic A. *Urban Lighting: Planning for Public Spaces in Vancouver's Southeast False Creek*. Diss. Queen's University Kingston, Ontario, Canada, 2012.
2. Smitka D. *Alternatives in Light & Space: Rethinking Public Lighting in Shared Spaces*. Master Thesis. RMIT University, Melbourne, Australia, 2011, 141 p.
3. *The Lighting Handbook*. Zumtobel Lighting Group, 2017. Available at: <http://www.zumtobel.com/PDB/teaser/RU/Lichthandbuch.pdf> (accessed 17.12.2017).
4. Haans A., De Kort Y.A.W. Light distribution in dynamic street lighting: two experimental studies on its effects on perceived safety, prospect, concealment, and escape. *Journal of Environmental Psychology*, 2012, vol. 32, no. 4, pp. 342–352. doi: 10.1016/j.jenvp.2012.05.006
5. Nutsford D., Reitsma F., Pearson A.L., Kingham S. Personalising the viewshed: visibility analysis from the human

- Applied Geography, 2015, V. 62, P. 1–7. doi: 10.1016/j.apgeog.2015.04.004
6. Cucchiella F., De Berardinis P., Lenny Koh S.C., Rotilio M. Planning restoration of a historical landscape: a case study for integrating a sustainable street lighting system with conservation of historical values // *Journal of Cleaner Production*. 2017. V. 165. P. 579–588. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.07.089
 7. Choi A.S., Jang S.J., Park B.C., Kim Y.O., Kim Y.S. Rational-design process and evaluation of street-lighting design for apartment complexes // *Building and Environment*. 2007. V. 42. N 8. P. 3001–3013.
 8. Hale J.D., Davies G., Fairbrass A.J. et al. Mapping lightscapes: spatial patterning of artificial lighting in an urban landscape // *PLoS One*. 2013. V. 8. N 5. Art. e61460. doi: 10.1371/journal.pone.0061460
 9. Arnheim R. *The Dynamics of Architectural Form: Based on the 1975 Mary Duke Biddle Lectures at the Cooper Union*. University of California Press, 1977. V. 376. 289 p.
 10. Renzler M., Reithmaier N., Reinhardt R., Pohl W., Ubmuller T. A road tunnel model for the systematic study of lighting situations // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018. V. 72. P. 114–119. doi: 10.1016/j.tust.2017.11.017
 11. Choi A.S., Kim Y.O., Oh E.S., Kim Y.S. Application of the space syntax theory to quantitative street lighting design // *Building and Environment*. 2006. V. 41. N 3. P. 355–366. doi: 10.1016/j.buildenv.2005.01.026
 12. Kim D., Park S. Improving community street lighting using CPTEd: a case study of three communities in Korea // *Sustainable Cities and Society*. 2017. V. 28. P. 233–241. doi: 10.1016/j.scs.2016.09.016
 13. Murray A.T., Feng X. Public street lighting service standard assessment and achievement // *Socio-Economic Planning Sciences*. 2016. V. 53. P. 14–22. doi: 10.1016/j.seps.2015.12.001
 14. Natapov A., Fisher-Gewirtzman D. Visibility of urban activities and pedestrian routes: an experiment in a virtual environment // *Computers, Environment and Urban Systems*. 2016. V. 58. P. 60–70. doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2016.03.007
 15. Schneider S., Tonn C., Bielik M., Donath D., Ruth J. Real-time solar analysis – Introducing a GPU-based method for calculating solar related performance criteria in the early design stages // *Proc. Building Simulation and Optimization (BSO14)*. London, 2014. P. 1–6.
 16. Weng J., Hu Y.K., Ying W. Study on calculation model of road lighting visibility // *Science China Technological Sciences*. 2010. V. 53. N 7. P. 1768–1773. doi: 10.1007/s11431-010-3127-0
 17. Pantoni R., Brandao D. A confirmation-based geocast routing algorithm for street lighting systems // *Computers and Electrical Engineering*. 2011. V. 37. N 6. P. 1147–1159. doi: 10.1016/j.compeleceng.2011.06.004
 18. SEP4 Roadway Lighting Design Guide [Электронный ресурс]. SaskPower Company, 2013. Режим доступа: http://www.saskpower.com/wp-content/uploads/residential_streetlight_engineering_practices.pdf, свободный. Яз. англ. (дата обращения 20.12.2017).
 19. Wojnicki I., Kotulski L., Sedziwy A., Ernst S. Application of distributed graph transformations to automated generation of control patterns for intelligent lighting systems // *Journal of Computational Science*. 2017. V. 23. P. 20–30. doi: 10.1016/j.jocs.2017.09.011
 20. Quick Urban Analysis Kit. [Электронный ресурс]. ETH Zurich. Режим доступа: qua-kit.ethz.ch (дата обращения 20.12.2017).
 21. Pena-Garcia A., Hurtado A., Aguilar-Luzon M.C. Impact of public lighting on pedestrians' perception of safety and well-being // *Safety Science*. 2015. V. 78. P. 142–148. doi: 10.1016/j.ssci.2015.04.009
 22. Rankel S. Future lighting and the appearance of cities at night: a case study // *Urbani Izziv*. 2014. V. 25. N 1. P. 126–141. doi: 10.5379/urbani-izziv-en-2014-25-01-004
 23. Unver A. *People's Experience of Urban Lighting in Public Space*. Master's Diss. Ankara, Turkey, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, 2009.
 24. Baleja R., Bos P., Novak T., Sokansky K., Hanusek T. Increasing of visibility on the pedestrian crossing by the additional lighting systems // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. V. 236. N 1. Art. 012099. doi: 10.1088/1757-899X/236/1/012099
 - perspective. *Applied Geography*, 2015, vol. 62, pp. 1–7. doi: 10.1016/j.apgeog.2015.04.004
 6. Cucchiella F., De Berardinis P., Lenny Koh S.C., Rotilio M. Planning restoration of a historical landscape: a case study for integrating a sustainable street lighting system with conservation of historical values. *Journal of Cleaner Production*, 2017, vol. 165, pp. 579–588. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.07.089
 7. Choi A.S., Jang S.J., Park B.C., Kim Y.O., Kim Y.S. Rational-design process and evaluation of street-lighting design for apartment complexes. *Building and Environment*, 2007, vol. 42, no. 8, pp. 3001–3013.
 8. Hale J.D., Davies G., Fairbrass A.J. et al. Mapping lightscapes: spatial patterning of artificial lighting in an urban landscape. *PLoS One*, 2013, vol. 8, no. 5, art. e61460. doi: 10.1371/journal.pone.0061460
 9. Arnheim R. *The Dynamics of Architectural Form: Based on the 1975 Mary Duke Biddle Lectures at the Cooper Union*. University of California Press, 1977, vol. 376, 289 p.
 10. Renzler M., Reithmaier N., Reinhardt R., Pohl W., Ubmuller T. A road tunnel model for the systematic study of lighting situations. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, vol. 72, pp. 114–119. doi: 10.1016/j.tust.2017.11.017
 11. Choi A.S., Kim Y.O., Oh E.S., Kim Y.S. Application of the space syntax theory to quantitative street lighting design. *Building and Environment*, 2006, vol. 41, no. 3, pp. 355–366. doi: 10.1016/j.buildenv.2005.01.026
 12. Kim D., Park S. Improving community street lighting using CPTEd: a case study of three communities in Korea. *Sustainable Cities and Society*, 2017, vol. 28, pp. 233–241. doi: 10.1016/j.scs.2016.09.016
 13. Murray A.T., Feng X. Public street lighting service standard assessment and achievement. *Socio-Economic Planning Sciences*, 2016, vol. 53, pp. 14–22. doi: 10.1016/j.seps.2015.12.001
 14. Natapov A., Fisher-Gewirtzman D. Visibility of urban activities and pedestrian routes: an experiment in a virtual environment. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2016, vol. 58, pp. 60–70. doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2016.03.007
 15. Schneider S., Tonn C., Bielik M., Donath D., Ruth J. Real-time solar analysis – Introducing a GPU-based method for calculating solar related performance criteria in the early design stages. *Proc. Building Simulation and Optimization, BSO14*. London, 2014, pp. 1–6.
 16. Weng J., Hu Y.K., Ying W. Study on calculation model of road lighting visibility. *Science China Technological Sciences*, 2010, vol. 53, no. 7, pp. 1768–1773. doi: 10.1007/s11431-010-3127-0
 17. Pantoni R., Brandao D. A confirmation-based geocast routing algorithm for street lighting systems. *Computers and Electrical Engineering*, 2011, vol. 37, no. 6, pp. 1147–1159. doi: 10.1016/j.compeleceng.2011.06.004
 18. *SEP4 Roadway Lighting Design Guide*. SaskPower Company, 2013. Available at: http://www.saskpower.com/wp-content/uploads/residential_streetlight_engineering_practices.pdf (accessed 20.12.2017).
 19. Wojnicki I., Kotulski L., Sedziwy A., Ernst S. Application of distributed graph transformations to automated generation of control patterns for intelligent lighting systems. *Journal of Computational Science*, 2017, vol. 23, pp. 20–30. doi: 10.1016/j.jocs.2017.09.011
 20. *Quick Urban Analysis Kit*. ETH Zurich. Available at: qua-kit.ethz.ch (accessed 20.12.2017).
 21. Pena-Garcia A., Hurtado A., Aguilar-Luzon M.C. Impact of public lighting on pedestrians' perception of safety and well-being. *Safety Science*, 2015, vol. 78, pp. 142–148. doi: 10.1016/j.ssci.2015.04.009
 22. Rankel S. Future lighting and the appearance of cities at night: a case study. *Urbani Izziv*, 2014, vol. 25, no. 1, pp. 126–141. doi: 10.5379/urbani-izziv-en-2014-25-01-004
 23. Unver A. *People's Experience of Urban Lighting in Public Space*. Master's Diss. Ankara, Turkey, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, 2009.
 24. Baleja R., Bos P., Novak T., Sokansky K., Hanusek T. Increasing of visibility on the pedestrian crossing by the

25. Green J., Perkins C., Steibach R., Edwards P. Reduced street lighting at night and health: a rapid appraisal of public views in England and Wales // *Health and Place*. 2015. V. 34. P. 171–180. doi: 10.1016/j.healthplace.2015.05.011
26. Painter K. The influence of street lighting improvements on crime, fear and pedestrian street use, after dark // *Landscape and Urban Planning*. 1996. V. 35. N 2. P. 193–201. doi: 10.1016/0169-2046(96)00311-8
- additional lighting systems. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 236, no. 1, art. 012099. doi: 10.1088/1757-899X/236/1/012099
25. Green J., Perkins C., Steibach R., Edwards P. Reduced street lighting at night and health: a rapid appraisal of public views in England and Wales. *Health and Place*, 2015, vol. 34, pp. 171–180. doi: 10.1016/j.healthplace.2015.05.011
26. Painter K. The influence of street lighting improvements on crime, fear and pedestrian street use, after dark. *Landscape and Urban Planning*, 1996, vol. 35, no. 2, pp. 193–201. doi: 10.1016/0169-2046(96)00311-8

Авторы

Сендер Арина Викторовна – преподаватель, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-9457-2469, arisend@gmail.com

Шиян Артём Викторович – студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-7328-4214, artem.shiyan68@gmail.com

Чиркина Александра Владимировна – младший научный сотрудник, InCube AG, Цюрих, 8002, Швейцария, ORCID ID: 0000-0002-2424-0944, aleksandra.klimkina@alumni.ethz.ch

Чиркин Артём Михайлович – аспирант, научный сотрудник, ETH Zurich, Цюрих, CH-8093, Швейцария, Scopus ID: 56084445400, ORCID ID: 0000-0001-6936-2040, chirkin@arch.ethz.ch

Муромцев Дмитрий Ильич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 55575780100, ORCID ID: 0000-0002-0644-9242, mouromtsev@mail.ifmo.ru

Authors

Arina V. Sender – lecturer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-9457-2469, arisend@gmail.com

Artem V. Shiyan – student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-7328-4214, artem.shiyan68@gmail.com

Aleksandra V. Chirkina – Junior Data Scientist, InCube AG, Zurich, 8002, Switzerland, ORCID ID: 0000-0002-2424-0944, aleksandra.klimkina@alumni.ethz.ch

Artem M. Chirkin – postgraduate, Scientific researcher, ETH Zurich, Цюрих, CH-8093, Switzerland, Scopus ID: 56084445400, ORCID ID: 0000-0001-6936-2040, chirkin@arch.ethz.ch

Dmitry I. Mouromtsev – PhD, Associate Professor, Head of Chair, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 55575780100, ORCID ID: 0000-0002-0644-9242, mouromtsev@mail.ifmo.ru