

На правах рукописи

Лукьянов Лев Евгеньевич

**ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СВЕТОВОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ
В ПРИРОДНОМ ЗАКАЗНИКЕ «ВОРОБЬЕВЫ ГОРЫ» (Г. МОСКВА)**

Специальность 1.6.21. Геоэкология (географические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Калининград – 2025

Работа выполнена на кафедре физической географии мира и геоэкологии географического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова.

Научный руководитель: **Красовская Татьяна Михайловна**,
доктор географических наук, доцент,
профессор кафедры физической географии
мира и геоэкологии географического
факультета, ФГБОУ ВО «Московский
государственный университет имени М.В.
Ломоносова»

Официальные оппоненты: **Черных Дмитрий Владимирович**,
доктор географических наук, доцент, главный
научный сотрудник лаборатории ландшафтно-
водноэкологических исследований и
природопользования ФГБУН «Институт
водных и экологических проблем Сибирского
отделения Российской академии наук»

Исаченко Татьяна Евгеньевна,
кандидат географических наук, доцент, доцент
кафедры страноведения и международного
туризма Института наук о Земле ФГБОУ ВО
«Санкт-Петербургский государственный
университет»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Тверской государственный
университет»

Защита диссертации состоится «26» ноября 2025 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета 24.2.273.01 при ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта» по адресу: 236041, г. Калининград, ул. А. Невского, д. 14, ауд. 202, e-mail: IGumeniuk@kantiana.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Балтийского федерального университета им. И. Канта (г. Калининград, ул. Университетская, д. 2). Электронные версии диссертации и автореферата размещены на официальном сайте ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта»: <https://kantiana.ru/postgraduate/dis-list/lukyanov-lev-evgenevich/>

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета, кандидат географических наук

И.С. Гуменюк

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования и степень ее разработанности. Начало использования осветительных приборов в разрастающихся городах закономерно привело к появлению на первых этапах освещения улиц, производственных предприятий и транспортных магистралей, а затем и архитектурно-художественного, чрезвычайно популярного в настоящее время. С ростом освещенности городских территорий постепенно начало проявляться их световое загрязнение (Сундукова, Ильина, 2015; Cinzano et al., 2001 и др.).

Световое загрязнение окружающей среды проявляется при периодическом или продолжительном превышении уровня естественной освещенности определенной территории в темное время суток, при котором избыточные световые потоки проникают за необходимые пределы освещенности (ГОСТ Р 56228–2014). Оценке светового загрязнения мешает отсутствие единых критериев допустимых значений освещенности, при которых фиксируются физиологические изменения. Для разных видов живых организмов эти значения колеблются в диапазоне 0,01–1000 лк (Gaston et al., 2013; Mayer-Pinto et al., 2021).

Световое загрязнение слабо регулируется, а эффекты его воздействия на природную среду и человека остаются мало изученными. В настоящее время известно, что у *растений* на избыточно освещенных территориях в результате резкой активации работы фоторецепторов сбиваются суточные и сезонные биоритмы, на 2–5 недель может возрасть продолжительность вегетационного периода, с чем связано дополнительное накопление фитомассы, депонирование углерода и т. д. (French-Constant et al., 2016; Škvareninová et al., 2017 и др.). При этом может снижаться зимостойкость растений, замедляться биогеохимический круговорот в результате повышения жесткости листвы, затрудняющее ее разложение (Cao et al., 2024), уменьшаться присутствие тенелюбивых и опыляемых ночными насекомыми видов (Рязанова, 2019; Hallmann et al., 2017 и др.). Влияние искусственного освещения на *насекомых* приводит к снижению на треть их видового разнообразия и численности: они перестают ориентироваться в пространстве, гибнут, сталкиваясь с осветительными приборами, наблюдаются изменения в их пищевом и половом поведении и т. д. (Eisenbeis et al., 2009; Geffen et al., 2015 и др.). У *птиц* искусственное освещение в ночное время вызывает множественные нарушения циркадных ритмов, приводящих к изменениям в физиологии, половом и гнездовом поведении, ночной активности (Wiltschko et al., 2010; Horton et al., 2019 и др.). У *земноводных, пресмыкающихся и ночных млекопитающих* наблюдается снижение репродуктивной функции, нарушаются природные инстинкты в добывании пищи и ориентации в пространстве и т. д. (Gaston et al., 2013 и др.). Искусственное освещение оказывает неблагоприятное воздействие и на *здоровье человека*, подавляя в ночное время выработку мелатонина и вызывая мутацию генов в гипоталамусе, что приводит к бессоннице, сахарному диабету второго типа, гипертонии, а на системном уровне – к сердечно-сосудистым заболеваниям, бесплодию, преждевременному старению репродуктивной системы, повышается предрасположенность к онкогенезу (Stevens, 1987; Kloog et al., 2008 и др.). Воздействие светового

загрязнения на *почвы* изучено слабее. Однако отмечено, что воздействие светового загрязнения приводит к повышению кислотности дерново-подзолистых почв, снижению содержания почвенной влаги и микробной активности в почвах (Новосёлов, 2021; Cesarz et al., 2023; Li et al., 2024). Таким образом, избыточное освещение оказывает негативное влияние на природную среду и человека и представляет собой актуальную геоэкологическую проблему, требующую решения.

Территории с избыточным освещением продолжают расти на локальном и региональном уровнях, приближаясь к глобальному распространению. В 2011–2022 г. уровень светового загрязнения в мире увеличивался ежегодно примерно на 10%, при этом наиболее стремительный рост освещенности наблюдается в городах, в пределах которых избыточные световые потоки проникают и в объекты зеленой инфраструктуры, включая особо охраняемые природные территории (ООПТ) (Kyba et al., 2017, 2023; Czarnecka et al., 2021).

Проблема светового загрязнения в ООПТ практически не имеет нормативного регулирования. Этот пробел напрямую сказывается на функционировании геосистем городских ООПТ, т.к. световое загрязнение начинает не только затрагивать их по периферии, но и целенаправленно внедряться вглубь, что приводит к ухудшению условий существования биоты, истощению экосистемных функций территорий, снижению их эстетической ценности и постепенной утрате ими природоохранного статуса. Все это наблюдается в природном заказнике «Воробьевы горы» в г. Москве, используемом для целей рекреации, где с 2018 г. функционирует ландшафтное освещение, установленное с целью «коррекции визуальной среды». Необходимость сохранения природоохранного статуса этой территории определило цель исследования.

Цель исследования: оценка уровня светового загрязнения и механизма его влияния на геосистемы городских ООПТ на примере модельной территории – природного заказника «Воробьевы горы». В соответствии с поставленной целью были сформулированы следующие **задачи исследования:**

1. Разработать методику изучения светового загрязнения для городских ООПТ.
2. Дать оценку пространственного распространения и уровня светового загрязнения в природном заказнике «Воробьевы горы» г. Москвы.
3. Определить количество дополнительной световой и тепловой энергии, поступающей в геосистемы природного заказника «Воробьевы горы» от источников искусственного освещения.
4. Предложить пути решения проблемы светового загрязнения в природном заказнике «Воробьевы горы» для сохранения его природоохранных функций.

Объект исследования – геосистемы природного заказника «Воробьевы горы» в условиях светового загрязнения.

Предмет исследования – антропогенное изменение потоков энергии как механизм влияния светового загрязнения на функционирование геосистем природного заказника «Воробьевы горы».

Материалы и методы исследования. Исследование строится на результатах полевых ландшафтно-экологических наблюдений, включающих геоботанические, фенологические, оценку антропогенной нагрузки и др., а также инструментальных измерениях мощности и спектра искусственного светового потока, расчетах его энергетического содержания (рис. 1). Тематические публикации использованы для изучения особенностей воздействия световых волн различных спектров и пульсации освещения, а также для оценки влияния избыточного освещения на живые организмы. Данные дистанционного зондирования привлекались для анализа пространственного распространения светового загрязнения на разных масштабных уровнях. Использовались муниципальные данные о современном состоянии хозяйственного использования изучаемой территории, а также результаты собственных социологических исследований, направленных на восприятие проблемы светового загрязнения посетителями природного заказника. Методами исследования стали сравнительно-описательный, ландшафтно-экологический, геофизический, картографический, социологический, эколого-экономический и культурологический.

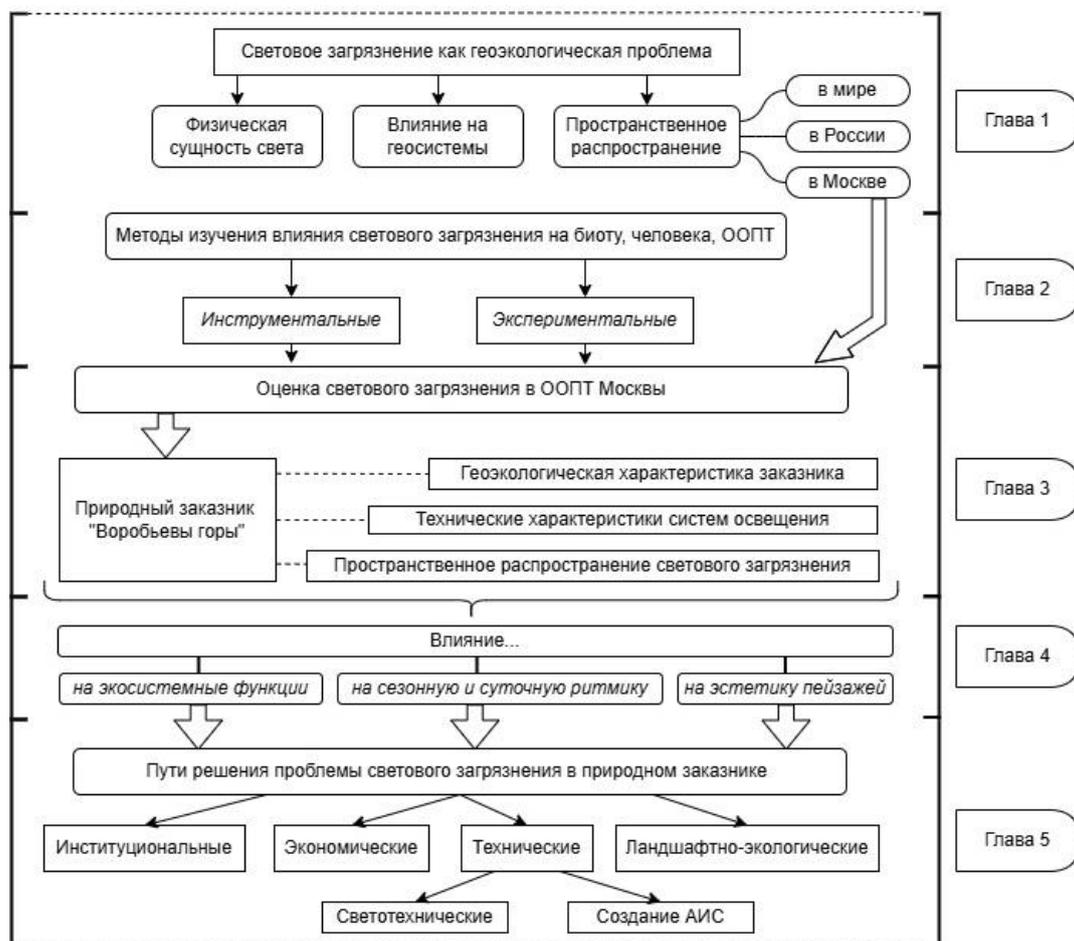


Рис. 1. Концептуальная модель диссертационного исследования

Положения, выносимые на защиту:

1. Геоэкологическая оценка светового загрязнения в городском ООПТ носит комплексный характер, основана на ландшафтно-экологических принципах и включает инструментальные площадные измерения интенсивности светового потока, его спектра и пульсации, расчеты потока дополнительной энергии, поступающей в геосистемы, а также выявление уязвимых природных и культурных объектов.
2. Природный заказник «Воробьевы горы» является наиболее освещенным природным заказником города Москвы при общей доле освещенной территории 44% и уровне освещенности отдельных участков до 18,4 тыс. лк против 0,9 лк на фоновых территориях заказника.
3. Ландшафтное освещение в природном заказнике «Воробьевы горы» привносит в геосистемы заказника до 70% дополнительной световой энергии, что может лежать в основе изменения их сезонной и суточной ритмики, а также приоритетных экосистемных функций.
4. Для сохранения природоохранных функций городских ООПТ в условиях светового загрязнения и высокой рекреационной нагрузки необходимы нормативные, планировочные и технические решения, важнейшими из которых являются создание микрорезерватов, регулирование интенсивности, спектрального состава и временных режимов работы искусственного освещения.

Научная новизна. Работа является первым комплексным геоэкологическим исследованием проблемы светового загрязнения, направленным на выявление механизма его влияния на геосистемы на основе полученных количественных геофизических показателей. Впервые получены количественные значения добавленной световой энергии, проникающей в геосистемы и потенциально приводящей к их изменениям, установлено отношение рекреантов к ландшафтному освещению заказника, предложены пути сохранения его природоохранного статуса в условиях высокой рекреационной нагрузки, продуцирующей световое загрязнение, дана первичная эколого-экономическая оценка ряда возможных изменений экосистемных функций территории, связанных со световым загрязнением. Предложена структура атласной информационной системы (АИС) как базы для принятия управленческих решений по минимизации светового воздействия на природную среду ООПТ.

Практическая значимость. Результаты исследования частично внедрены в работу Эколога-просветительского центра «Воробьевы горы» в Москве и в районе п. Рыбачий на Куршской косе (Калининградская область), могут быть использованы при подготовке рекомендаций по оптимальному освещению городских/поселковых природных территорий, при принятии управленческих решений по функциональному зонированию городских ООПТ, испытывающих световое загрязнение, с целью сохранения их природоохранного статуса, а также в учебном процессе при чтении курсов «Введение в геоэкологию», «Методы ландшафтных геоэкологических исследований», «Ландшафтная видеоэкология» и др., при подготовке географов, экологов, урбанистов, светотехников и т. д.

Личный вклад. Автор разработал алгоритм комплексного геоэкологического анализа эффекта физического загрязнения – светового – для городских ООПТ. Им актуализирована рукописная ландшафтная карта заказника (Виноградова, 2007), положенная в основу площадных исследований, выполнены инструментальные измерения освещенности, выявлены возможные изменения ряда экосистемных функций под воздействием светового загрязнения, установлены попадающие в зону светового загрязнения наиболее эстетически ценные ландшафты заказника, изучено восприятие ландшафтного освещения рекреантами, предложены пути сохранения природоохранного статуса территории в условиях высокой рекреационной нагрузки и структура атласной информационной системы (АИС) для разработки управленческих механизмов рационального использования территории, часть из которых была обоснована для внедрения в заказнике.

Степень достоверности, апробация результатов и публикации. По теме диссертации опубликовано 14 научных работ, из которых 7 работ входят в перечень рецензируемых научных изданий в базах данных Scopus, Web of Science, RSCI и из дополнительного списка рецензируемых научных изданий из перечня, рекомендованного Минобрнауки России. Результаты исследования доложены на 7 научных и научно-практических конференциях, в числе которых два доклада на международных конференциях («Экология речных бассейнов», 2023; «I Белорусский географический конгресс», 2024).

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка используемой литературы, включающего 359 источников (из них 208 на английском языке), и трех приложений. Объем работы – 178 страниц, включая 54 рисунка и 26 таблиц.

Благодарности. Автор выражает глубочайшую признательность научному руководителю – профессору, д.г.н. Красовской Т.М. за идею постановки исследования, всестороннюю помощь и поддержку на всех этапах его осуществления; профессору географического факультета МГУ, д.г.н. Тикунову В.С. за помощь в математической обработке данных; с.н.с. географического факультета МГУ, к.г.н. Чижовой В.П. и эколога-просветительскому центру «Воробьевы горы» за предоставленные картографические материалы; а также сотрудникам географического факультета МГУ: доцентам, к.г.н. Медведкову А.А., Емельяновой Л.Г., Сусловой Е.Г., с.н.с., к.г.н. Семенкову И.Н. и Марковой О.И., инженеру Третьяченко Д.А., доценту физического факультета МГУ, к.ф.-м.н. Туркину А.Н. и аспиранту того же факультета Яникову У.М, аспиранту МЭИ Новикову Е.А., за высказанные замечания и тематические консультации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность исследования, ее научная новизна, практическая значимость, сформулированы защищаемые положения и приведены сведения об апробации работы. Глава 1 посвящена обзору проблемы светового загрязнения: рассмотрено влияние на геосистемы и приведен анализ его пространственного распространения. В главе 2 рассмотрены методические

подходы к изучению светового загрязнения, в т.ч. для территорий ООПТ. В главах 3 и 4 рассмотрено световое загрязнение в природном заказнике «Воробьевы горы»: его пространственное распространение, технические характеристики и влияние на экосистемные функции заказника. В главе 5 изложены возможные пути решения проблемы светового загрязнения в заказнике: институциональные, экономические, технические и ландшафтно-экологические. Заключение содержит основные выводы диссертационной работы.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Первое защищаемое положение. *Геоэкологическая оценка светового загрязнения в городском ООПТ носит комплексный характер, основана на ландшафтно-экологических принципах и включает инструментальные площадные измерения интенсивности светового потока, его спектра и пульсации, расчеты потока дополнительной энергии, поступающей в ландшафты, а также выявление уязвимых природных и культурных объектов.*

Несмотря на быстро увеличивающееся число исследований светового загрязнения, до сих пор не выработано общей методики его изучения. Поскольку городские ООПТ представляют собой сложные социоприродные системы, в которых как природные, так и социальные элементы выполняют важные функции, был использован комплекс следующих геоэкологических методов для изучения их светового загрязнения.

Дистанционный метод применялся для анализа пространственного распространения светового загрязнения с помощью мелкомасштабных космических снимков, выполненных в видимом дневном и ночном инфракрасном диапазоне DNB VIIRS и полученных со спутника Suomi NPP. На их основе с помощью геоинформационных технологий проведено изучение динамики роста освещенных территорий Москвы за последнее десятилетие. Однако низкое пространственное разрешение космических снимков, используемых для этих целей, не позволяет работать в крупном масштабе, что обуславливает необходимость проведения инструментальных измерений.

Инструментальные наземные измерения светового загрязнения проводились люксметром СЕМ DT-1301 (разрешение 0,1 лк; частота измерений 1,5 раз/сек.) внутри ландшафтных контуров выбранного масштаба, а также по регулярной сети с шагом, определяемым ландшафтной структурой и характером землепользования территории – в среднем через каждые 15–20 м, однако шаг иногда изменялся в зависимости от доступности участка, особенностей рельефа или ландшафтной структуры, влияющих на распределение световых потоков. При этом все ландшафтные урочища были обеспечены инструментальными измерениями пропорционально занимаемой ими площади. Измерения освещенности от источников уличного и ландшафтного освещения выполнялись как на уровне человеческого роста, так и над прожекторами освещения. Всего выполнено 703 замера уровня освещенности. Измерения проводились в ночное время (с 22:00 до 03:00) в конце вегетационного периода в 2021 г.

Если мелкомасштабное *картографирование* светового загрязнения проводилось по данным дистанционного зондирования, то крупномасштабное картографирование представлено с использованием данных инструментальных измерений тремя способами картографического изображения: а) изолиний-изолукс, соединяющих точки с одинаковыми значениями освещенности; б) ареалов, очерчивающих на карте участки с фоновым значением освещенности; в) точечного способа, отображающего непосредственно источники светового загрязнения (фонари, прожекторы). Способ ареалов на данном этапе исследований признан наилучшим.

Геофизический метод изучения светового загрязнения основывается на подсчете количества энергии фотонов света, поступающих в ландшафт от источников искусственного освещения. На основе технических характеристик систем освещения определялось количество световой энергии (в джоулях), поступающей на 1 м² территории, с последующим сравнением с количеством ФАР в течение дня, для начала и конца вегетационного периода, а также для периода вечерних сумерек, когда включается искусственное освещение. Определялось также и количество тепловой энергии, выделяемой осветительными системами.

Ландшафтное профилирование и картографирование, ландшафтно-экологические исследования проведены для изучения ландшафтной структуры территории в целях выявления степени антропогенной трансформации ландшафтов, местообитаний редких видов растений и животных, определения эстетической ценности участков заказника по методике (Эрингис, 1975; Дирин, 2005). Ландшафтно-экологическое профилирование выполнялось по методике (Беручашвили, Жучкова, 1997) и было использовано для актуализации рукописной ландшафтной карты на территорию заказника (2007 г.) на основании современных данных, а также для выявления ареалов искусственного освещения на основе инструментальных измерений уровня освещенности в различных ландшафтных условиях.

Геоботаническое и зоогеографическое маршрутное обследование территории производилось на освещенных и неосвещенных участках аналогичных ландшафтных выделов, при котором сравнивались видовая структура фитоценозов, фенологические фазы развития растений, определялись возможные чувствительные к световому загрязнению виды. Для мониторинга дальнейших изменений было заложено 8 тестовых площадок на участках, испытывающих световое загрязнение, и фоновых, при этом тестовые площадки располагались в типичных ландшафтных условиях заказника. Фиксировался видовой состав наземного травяного покрова в условиях различной освещенности, а также возможная реакция растений на избыточную освещенность. Маршрутное обследование проводилось весной (в мае).

Историко-культурный и социологический методы. Поскольку территория ООПТ используется в рекреационных целях, устанавливались объекты природного и культурного наследия, световое загрязнение которых сказывается на их облике и свойствах. Определение отношения людей к ландшафтному

освещению и выявленным эстетически ценным пейзажным участкам ООПТ, искажаемым световым загрязнением, проводилось путем социологического опроса в летне-осенний период 2022 г. (128 респондентов).

Математическое моделирование использовалось для решения практической задачи, требующей совокупного анализа разнообразных характеристик модельной территории. Из возможных методов (Савин, 2004, 2019; Топчиев, 1988; Тикунов, 1997; Hwang et al., 1981 и др.) был выбран методический подход В. С. Тикунова, фактически воспроизводящий регрессионный анализ, используемый для установления причинно-следственных связей между независимыми и зависимыми переменными. С помощью метода анализировалась совокупность характеристик территории и критерии изменения ландшафтов (всего 10 характеристик: количество видов растений и животных, внесенных в Красную книгу Москвы; количество объектов историко-культурного наследия; типичность встречаемости ландшафтного урочища; уровень освещенности; уровень шума; наличие механических антропогенных нарушений; объектов визуального загрязнения; объектов инфраструктуры; ограниченная доступность посещения; посещаемость). Было выполнено ранжирование территории ООПТ для определения участков с максимально сохранившимися ландшафтами, нуждающимися в сохранении в первую очередь – микрорезерватов.

Второе защищаемое положение. *Природный заказник «Воробьевы горы» является наиболее освещенным природным заказником города Москвы при общей доле освещенной территории 44% и уровне освещенности отдельных участков до 18,4 тыс. лк против 0,9 лк на фоновых территориях заказника.*

Москва является одним из наиболее освещенных городов мира (3-е место в 2024 г.). За десятилетие 2013–2023 гг. площадь участков с фоновыми значениями освещенности (т.е. участков, лишенных источников искусственного освещения; до 3 нВт/см²ср) сократилась на 10,9%, в то время как общая площадь территорий со средней и высокой степенью светового загрязнения (от 15 нВт/см²ср) возросла на 8,5% (рис. 2). Лишь на 18% территории уровень освещенности не изменился, в то время как на 71% территории Москвы наблюдается рост освещенности, что связано с установкой архитектурно-художественной иллюминации на сооружениях столицы и дополнительного наружного освещения на транспортных магистралях и набережных.

Вместе с этим возросла и освещенность некоторых ООПТ, среди которых именно в комплексных природных заказниках допускается изменение характера использования земель, наблюдается увеличение рекреационной нагрузки, что объясняется особенностями их нормативно-правового регулирования (к природоохранной функции добавляется «обеспечение условий для прогулок и отдыха в природном окружении»).

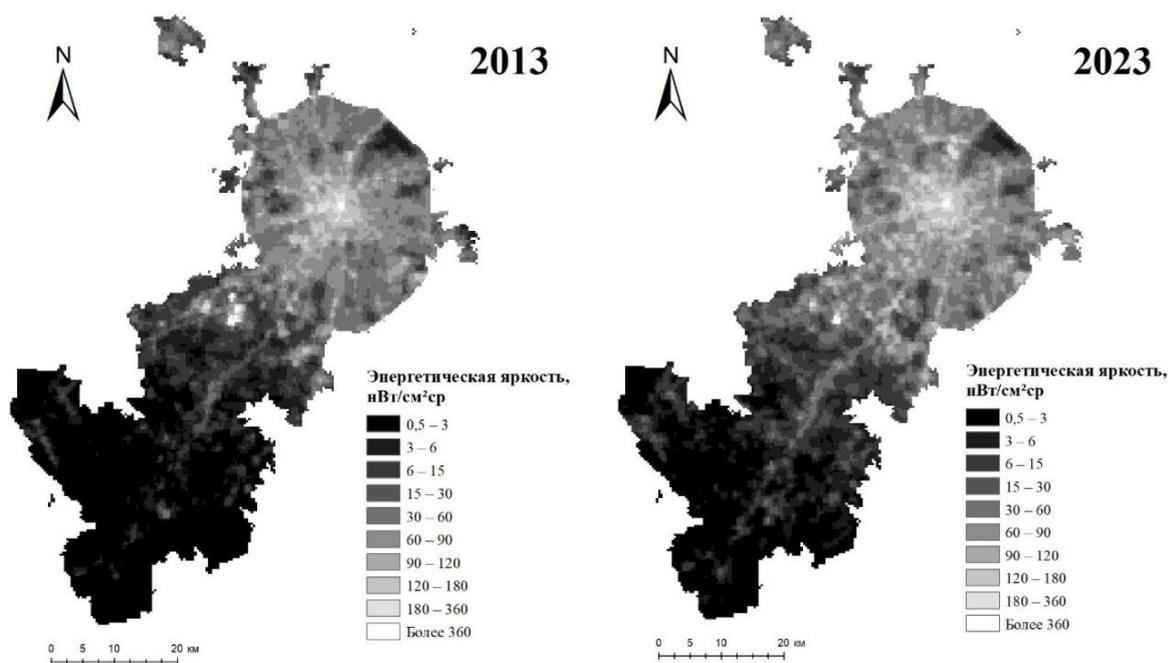


Рис. 2. Освещенность Москвы в 2013 и 2023 г. Составлено автором по растровым данным с <https://www.lightpollutionmap.info/>

В результате инструментальных площадных измерений уровня освещенности в 10 комплексных природных заказниках столицы было выявлено, что проблема светового загрязнения наиболее остро выделяется в заказнике «Воробьевы горы» (табл. 1), где установлено ландшафтное освещение. Заказник характеризуется интенсивным рекреационным использованием и отличается от других заказников богатым видовым разнообразием флоры и фауны, в том числе видов, внесенных в Красную книгу Москвы, что и обусловило выбор его в качестве модельного объекта настоящего исследования.

Таблица 1. Освещенность комплексных природных заказников г. Москвы

Природный заказник	Площадь	Площадь освещенной территории	Доля освещенной территории в общей площади заказника
Аннинский	9,5 га	0,2 га	1,5%
Воробьевы горы	137,5 га	59,9 га	44%
Дегунинский	8,5 га	3,9 га	46%
Долина реки Горетовки	105,5 га	24,7 га	23,4%
Долина реки Сетунь	700 га	106,4 га	15,2%
Долина реки Сходни в Алабушево	44,5 га	10,2 га	22,9%
Жулебинский	112 га	6,3 га	5,6%
Северный	93,5 га	8,3 га	8,9%
Склоны долины реки Москвы в Сабурово	4 га	1,54 га	61,5%
Троицкий	17,1 га	1,8 га	10,2%

Составлено автором на основе инструментальных измерений.

Природный заказник «Воробьевы горы» расположен в юго-западной части Москвы, площадь – 137,5 га. В 1998 г. территория обрела статус природного заказника, а в 2013 г. постановлением Правительства Москвы была передана в безвозмездное пользование ЦПКиО «Парк Горького».

Воробьевы горы представляют собой резко обрывающийся к р. Москве высокий правый берег Теплостанской возвышенности с относительной высотой 65–67 м. В ландшафтной структуре выделяются такие ландшафтные комплексы, как эрозионно-оползневые ложбины с разнотравными широколиственными лесами и искусственными насаждениями на дерново-подзолистых и дерновых оглеенных почвах; крутые склоны долины (до 40°) с кленово-дубово-липовыми разнотравными лесами на маломощных дерновых, местами смытых почвах; расчлененные поперечными эрозионными формами оползневые склоны (до 10°) с разнопородными разнотравными лесами на дерновых глееватых почвах; аллювиальные террасы: коренные (под дубовыми и кленово-липовыми разнотравными лесами на дерновых глееватых почвах) и техногенно выровненные (под кленовыми и липовыми лесами и березовыми искусственными насаждениями на урбоземах дерново-подзолистого типа).

Заказник «Воробьевы горы» характеризуется богатым видовым разнообразием флоры и фауны. На его территории произрастает более 40 видов деревьев; из более чем 330 видов растений около 40 внесены в Красную книгу Москвы (незабудка болотная, горицвет кукушкин, астрагал датский и др.). В заказнике обитают более 70 видов птиц, более половины которых внесены в Красную книгу Москвы: малый пестрый дятел, пеночка-теньковка, ястреб-тетеревятник и др.

38% площади территории заказника занимают сторонние землепользователи: Андреевский монастырь, правительственные резиденции и комплекс институтов РАН на ул. Косыгина, спортивный комплекс. В заказнике расположено 14 объектов культурного наследия, в том числе пять памятников федерального значения (Андреевский монастырь, усадьба Дмитриева-Мамонова с прилегающими строениями, храм Живоначальной Троицы на Воробьевых горах). Заказник является одним из наиболее посещаемых ООПТ Москвы (оценочно более 4 млн чел. в год). Среди видов антропогенных воздействий на геосистемы выделяются химическое и шумовое загрязнение (преимущественно от автотранспорта), рекреационная дигрессия, визуальное загрязнение.

На территории природного заказника «Воробьевы горы» функционирует два вида искусственного освещения: уличное и ландшафтное. Уличное освещение, установленное вдоль заложеной тропиночно-дорожной сети, формируется натриевыми лампами высокого давления (НЛВД) и светодиодными фонарями, при этом лампы направлены вниз и освещают дорожки и прилегающие к ним территории. Уровень освещенности под НЛВД составляет 9–20 лк (в зависимости от высоты фонарного столба), под светодиодными фонарями достигает 120–145 лк.

Ландшафтное освещение формируется прожекторами, установленными на массивных опорах (всего 1000) в 3–5 рядов по нижнему ярусу склона вдоль

набережной (рис. 3). На каждой опоре установлено 12 светодиодных прожекторов мощностью 163 Вт каждый.



Рис. 3. Ландшафтное освещение в природном заказнике «Воробьевы горы». Фото автора.

Освещение включается через 15 минут после захода Солнца и работает до полуночи, выполняя светоцветовой сценарий продолжительностью 11 секунд, по ходу которого сменяются красный, желтый, зеленый, синий, розовый и другие цвета (рис. 4). Световой луч прожекторов направлен в кроны деревьев под углом 45–60°. При этом уровень освещенности зависит от расстояния датчика люксметра до прожектора (табл. 2) и достигает 18,4 тыс. лк, что сравнимо с уровнем естественной освещенности в пасмурный летний день (Ландсберг, 2009).

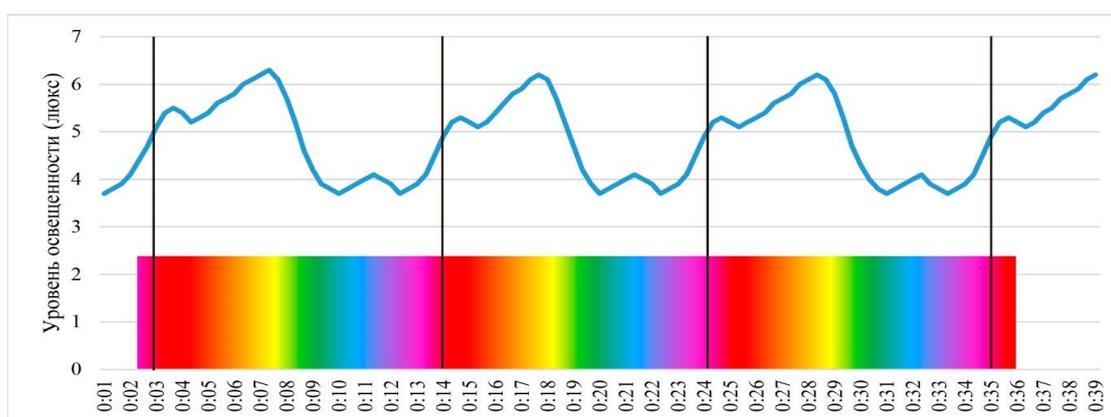


Рис. 4. Светоцветовой сценарий ландшафтного освещения в природном заказнике «Воробьевы горы». Замеры между двумя опорами освещения на уровне человеческого роста. По оси абсцисс – время, по оси ординат – уровень освещенности (лк). Составлено автором.

Таблица 2. Зависимость уровня освещенности от расстояния до прожектора

Расстояние от прожектора, м	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15
Освещенность, лк	18430	9450	5800	2350	1100	405	260	157	82	34	12,1

Фоновое значение освещенности различается в зависимости от метеорологических условий и характера подстилающей поверхности. Для территории заказника установлено несколько фоновых значений (табл. 3), в настоящем исследовании анализ пространственного распространения светового загрязнения строился исходя из максимального фонового значения (0,9 лк).

Таблица 3. Фоновые значения освещенности в заказнике «Воробьевы горы»

	Безоблачная погода	Облачная погода
Январь	0,4–0,5 лк	0,9 лк
Июль	0,1–0,2 лк	0,3 лк

Из 87,8 га земель ООПТ уличное освещение затрагивает 41,7 га – почти половину ООПТ, что связано с высокой плотностью дорожно-тропиночной сети. Ландшафтное освещение охватывает 40,1 га, перекрывая частично ареал засветки от уличного освещения. Общая площадь засветки составляет 59,9 га (рис. 5), т. е. лишь 32% территории ООПТ (за вычетом застроенных пространств) остается пока незатронутой световым загрязнением. Наименее освещенными являются крутые склоны под дубово-вязово-липовыми и кленово-липовыми разнотравными лесами – всего 20–30% площади. Чем ближе к набережной, тем выше освещенность: аллювиальные террасы освещены на 50–70%, примыкающие к набережной оползневые склоны и техногенно преобразованная пойма – на 90–100%.

Урочища и их антропогенные модификации

(в скобках указана освещенность ландшафтного выдела, в %)

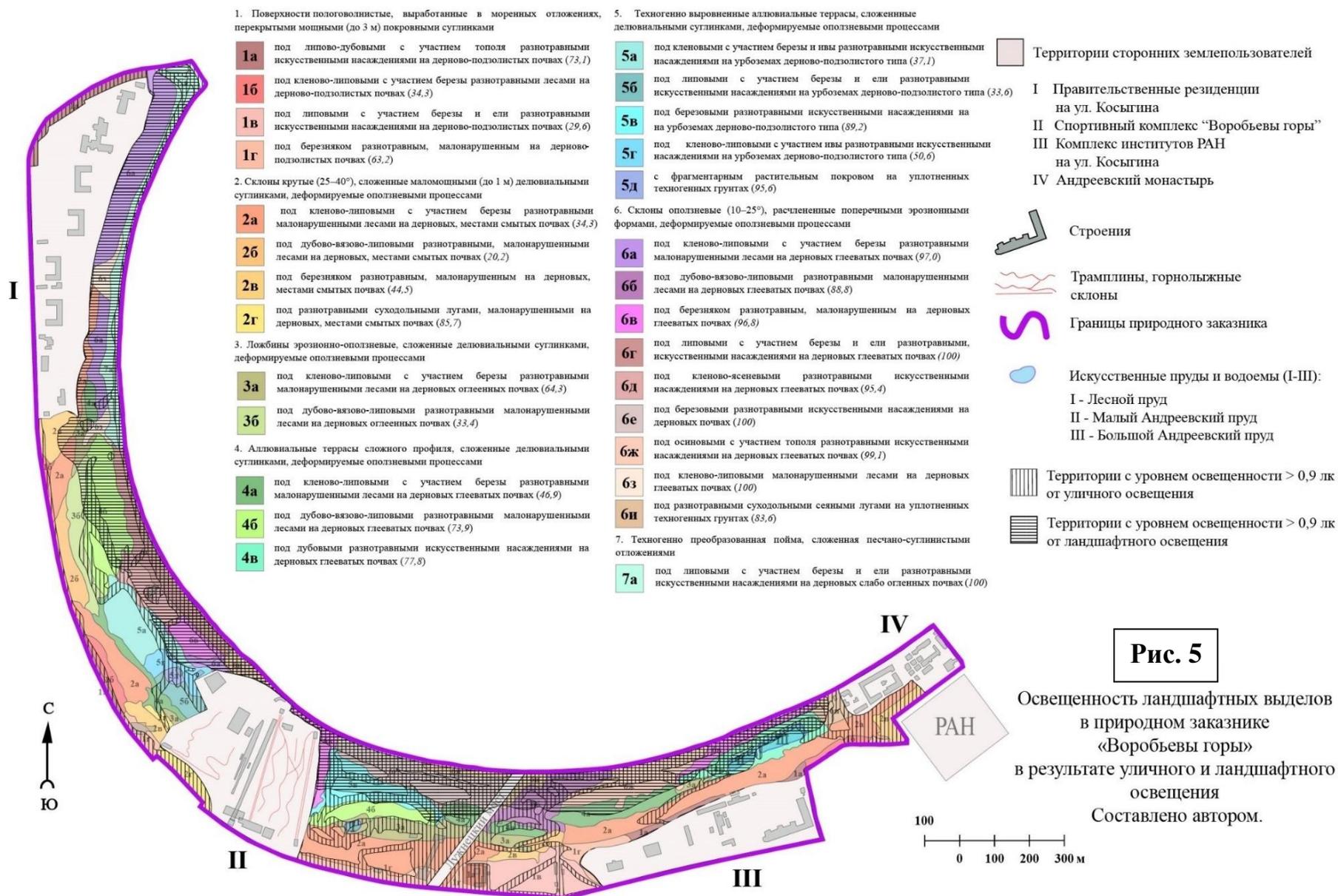
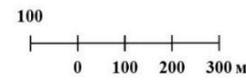


Рис. 5

Освещенность ландшафтных выделов в природном заказнике «Воробьевы горы» в результате уличного и ландшафтного освещения
Составлено автором.



Третье защищаемое положение. *Ландшафтное освещение в природном заказнике «Воробьевы горы» привносит в геосистемы заказника до 70% дополнительной световой энергии, что может лежать в основе изменения их сезонной и суточной ритмики, а также приоритетных экосистемных функций.*

Световое загрязнение может рассматриваться в виде притока дополнительной энергии фотонов в ландшафт, способного оказывать влияние на ритмичность природных процессов, выраженных в сезонных и суточных ритмах развития. Тепловая энергия от осветительных приборов также может оцениваться как геофизический (энергетический) фактор антропогенной динамики ландшафта.

При КПД, равным 8%, один светодиод излучает 0,24 Вт в виде световой энергии и 2,76 Вт рассеивает в виде тепловой энергии. В пересчете на 1 м² кроны приток добавленной световой энергии составит 23 Дж/мин., тепловой энергии – 270 Дж/мин. Тогда при стабильном режиме работы за год ландшафтным освещением всего будет излучено $1,05 \cdot 10^{12}$ Дж световой энергии и выделено $12,1 \cdot 10^{12}$ Дж тепла, что суммарно эквивалентно количеству тепла, высвобождаемому при сгорании 392 м³ нефти. Доля добавленной энергии светового потока от суммарной в летние месяцы составляет 3–6%, а в зимнее время, когда количество солнечной радиации резко снижается, доля возрастает до 50–70% (табл. 4).

Таблица 4. Сопоставление потоков ФАР (в т.ч. с учетом КПД) и добавленной энергии

Месяц	ФАР, МДж/м ₂	ДЭ, МДж/м ₂	Σ, МДж/м ₂	Доля ДЭ от Σ, %	ФАР _{кпд} , МДж/м ²	ДЭ, МДж/м ₂	Σ _{кпд} , МДж/м ₂	Доля ДЭ от Σ _{кпд} , %
I	23	0,31	23,3	1,33%	0,26	0,31	0,58	54%
II	50	0,24	50,2	0,48%	0,58	0,24	0,82	30%
III	115	0,22	115,2	0,19%	1,32	0,22	1,55	14%
IV	177	0,17	177,2	0,10%	2,04	0,17	2,21	8%
V	258	0,14	258,1	0,05%	2,97	0,14	3,10	4%
VI	271	0,11	271,1	0,04%	3,12	0,11	3,22	3%
VII	265	0,12	265,1	0,04%	3,05	0,12	3,16	4%
VIII	202	0,16	202,2	0,08%	2,32	0,16	2,48	6%
IX	123	0,20	123,2	0,17%	1,41	0,20	1,62	13%
X	57	0,27	57,3	0,47%	0,66	0,27	0,92	29%
XI	21	0,30	21,3	1,42%	0,24	0,30	0,54	56%
XII	13	0,33	13,3	2,49%	0,15	0,33	0,48	69%

Условные обозначения:

ФАР – фотосинтетически активная радиация; ДЭ – добавленная энергия от светового потока; Σ – суммарная энергия (ФАР + добавленная); Доля ДЭ от Σ – доля добавленной энергии от суммарной; ФАР_{кпд} – ФАР с учетом коэфф. поглощения, равного 1,15% (Бурцев, 2013; Дьяконов и др., 2017); Σ_{кпд} – суммарная энергия (ФАР_{кпд} + добавленная); Доля ДЭ от Σ_{кпд} – доля добавленной энергии от суммарной с учетом ФАР_{кпд}

В условные начальные дни «перестроечного» периода в ландшафтах, когда начинается и заканчивается вегетационный период у растений (периоды распускания почек и листопада), добавленная световая энергия может приводить к ускорению «запуска» фенологических процессов и выступать своего рода «триггером» трансформации ландшафта. В начале вегетационного периода (27–30 апреля) количество добавленной энергии составит $20,7 \text{ кДж/м}^2$, в конце вегетационного периода (1–4 октября) – $31,4 \text{ кДж/м}^2$ (при общем поступившем в ландшафт количестве ФАР в 322 кДж/м^2 и 92 кДж/м^2 соответственно), следовательно, прирост в конце апреля составит 6,4%, а в начале октября – 34,1%.

«Физиологически активная» длина дня включает в себя и сумеречное время (Шульгин и др., 2016), которое также является «перестроечным» периодом для ландшафта, когда происходят суточные изменения ритмов живой природы: изменяются метеорологические характеристики, меняется функционирование биоты и т. д. (Солнцев, 2001). Добавленная энергия светового потока в весенний период дает прирост 18,2% к количеству рассеянной солнечной радиации, поступающей на поверхность в период сумерек, и 44,9% в аналогичный период осенью. Такое количество избыточной световой энергии, вероятно, может быть толчком для запуска циркадных ритмов биоты.

Световое загрязнение может вызывать трансформацию экосистемных функций в ландшафтах городских ООПТ. В связи с этим на основании базы данных тематических публикаций проведена оценка их *возможной* трансформации на модельной территории при выявленном уровне светового загрязнения.

Влияние на регулирующие экосистемные функции. При увеличении продолжительности вегетационного периода древесного покрова на 2–5 недель в условиях светового загрязнения могут быть зафиксированы:

- более долгая фильтрация загрязненного воздуха – прирост объема улавливаемых взвешенных частиц составит до 23,3% (с 16,9 до 18,4–20,9 т);
- более длительное выполнение шумозащитной функции;
- более продолжительный период защиты от неблагоприятных погодных явлений (регулирование микроклимата);
- нарушение функции защиты почв от эрозии и активизация оползней вследствие деградации наземного растительного покрова и обнажения оползневых склонов;
- нарушение водоочистной и водорегулирующей функции из-за снижения емкости катионного обмена вследствие повышения кислотности почв;
- нарушение функции опыления из-за гибели насекомых-опылителей у источников искусственного освещения, что создает угрозу исчезновения ряда растений, включенных в Красную книгу Москвы.

Влияние на поддерживающие экосистемные функции. При увеличении продолжительности вегетационного периода древесного покрова на 2–5 недель в условиях светового загрязнения могут быть зафиксированы:

- более длительный период депонирования углерода – прирост объема депонирования составит до 23,3% (с 243,4 до 294,2 т CO₂ в год);
- прирост объема чистой первичной продукции ассимилирующими органами древостоя с 0,78 до 0,96 кг/м²;
- нарушение функции поддержания биоразнообразия вследствие исчезновения тенелюбивых растений и изменения режима их вегетации. Зафиксировано отсутствие на участках со световым загрязнением тенелюбивых видов: недотроги мелкоцветковой, пролесника многолетнего, подмаренника промежуточного – эти виды могут выступать в качестве видов-маркеров для фоновых участков. Видами-маркерами для освещенных участков, вероятно, могут быть копытень европейский, чистяк весенний, ветреница дубравная и др. Выявлено, что на освещенных участках зацветают раньше, чем на фоновых участках, такие виды, как яснотка желтая, ветреница лютиковая, воронец колосистый и т. д. Однако окончательные выводы требуют более длительных наблюдений.

Влияние на информационные экосистемные функции выражается в снижении эстетической ценности ландшафтов. Результаты проведенного социологического опроса показали, что, хотя 55% респондентов и нравится ландшафтное освещение, однако 73% их считает, что оно искажает естественный природный вид заказника. 68% респондентов не знает о негативном влиянии ландшафтного освещения на птиц, а 55% респондентов выступает за то, чтобы ландшафтное освещение работало только по праздникам. Таким образом, понимание в целом проблемы светового загрязнения и его последствий у населения ограничено.

Четвертое защищаемое положение. *Для сохранения природоохранных функций городских ООПТ в условиях светового загрязнения и высокой рекреационной нагрузки необходимы нормативные, планировочные и технические решения, важнейшими из которых являются создание микрорезерватов, регулирование интенсивности, спектрального состава и временных режимов работы искусственного освещения.*

Природоохранный статус не защищает городские ООПТ от растущего светового воздействия на их территории. Поэтому пути решения проблемы светового загрязнения должны лежать в области технического, экономического и нормативного регулирования, а также экологического просвещения. Охарактеризуем некоторые из них.

Экономическое регулирование. Избыточное и ненужное освещение территорий приводит к необоснованным затратам на электроэнергию, поэтому решение проблемы светового загрязнения может лежать в экономической плоскости – интенсивность ландшафтного освещения может быть уменьшена, если затраты на электроэнергию, потребляемую системами освещения, окажутся неоправданно большими. При известной мощности прожекторов и тарифов на электроэнергию получим стоимость одного часа работы ландшафтного освещения, равной 13,1 тыс. руб. Тогда при известном посуточном времени работы освещения в течение года получим стоимость затраченной за год

электроэнергии, равной 24,4 млн руб. за выработку 3644,6 МВт·ч – крайне малой цифры в общей выработке электроэнергии Московским регионом. Тем не менее произведенный расчет экономии затраченных средств для различных режимов работы ландшафтного освещения (режим работы по праздникам / по выходным / в определенные часы / комбинированный режим) показывает, что экономия может составить от 1,7 до 22,3 млн руб. Наиболее целесообразной представляется комбинация различных режимов – например, работа по выходным и праздничным дням до 22 или 23 часов вечера.

Для решения проблемы светового загрязнения в заказнике может быть предложено и несколько *технических приемов*, составленных с учетом вероятных технических возможностей систем освещения на территории заказника. Среди них: 1) описанное выше регулирование режима работы; 2) регулирование спектрального состава освещения, направленное на отказ от использования желтого, оранжевого и красного света, негативно влияющего на птиц, и фиолетового и розового цветов, оказывающих неблагоприятное воздействие на здоровье человека ввиду повышенных значений коэффициента пульсации; 3) выключение прожекторов на участках, не требующих освещения; 4) демонтаж опор освещения как наиболее радикальная мера, сопряженная со значительными нарушениями почвенно-растительного покрова.

Институциональные методы регулирования светового загрязнения в той или иной степени в настоящее время развиты лишь в некоторых странах – Чехии, Испании, Франции, США (Falchi, 2021), однако не включают ООПТ. Нормирование освещения в России затрагивается в нескольких санитарно-гигиенических документах, включает жилые и производственные помещения, однако нормы освещенности в пределах городских ООПТ отсутствуют, т.к. природоохранный статус должен исключать наличие в их пределах светового загрязнения. Отсутствие единых критериев допустимых значений освещенности для разных видов живых организмов делает пока невозможным институциональное нормирование светового загрязнения. Таким образом, единственным возможным допустимым уровнем освещенности в городских ООПТ должно являться фоновое значение при полном отсутствии любых источников искусственного освещения в ООПТ.

Это едва ли возможно в природном заказнике «Воробьевы горы» ввиду интенсивного его использования в рекреационных целях, что наталкивает на необходимость решения проблемы светового загрязнения путем принятия *планировочных решений* – выделения на территории заказника микрорезерватов, т.е. участков полного заповедания, в которых любая антропогенная нагрузка на геосистемы была бы максимально исключена, что позволило бы сохранить природоохранный статус территории (Дьяконов и др., 2002; Черных, 2008).

При помощи метода построения нечетких классификаций (Тикунов, 1997) были выявлены участки с характеристиками, соответствующими микрорезерватам: фоновое значение освещенности и шумовой нагрузки, минимальная антропогенная нарушенность, отсутствие объектов инфраструктуры, наличие видов растений и животных, внесенных в Красную

книгу и т. д., соотнесенные с ландшафтными контурами. Общая площадь микрорезерватов составила 15,1% от общей площади заказника. Такие участки включают 9 (из 28 представленных в заказнике) типов ландшафтных урочищ, в числе которых пологоволнистые равнинные участки под кленово-липово-дубовыми разнотравными лесами и искусственными насаждениями на дерново-подзолистых почвах; крутые склоны ($25\text{--}40^\circ$) под кленово-вязово-липовыми разнотравными малонарушенными лесами на дерновых, местах смытых почвах; эрозионно-оползневые ложбины под дубово-вязово-липовыми разнотравными малонарушенными лесами на дерновых оглеенных почвах; деформируемые оползневыми процессами аллювиальные террасы под кленово-липовыми разнотравными малонарушенными лесами на дерновых глееватых почвах.

Использованный метод построения нечетких классификаций позволил также выявить участки, которые могли бы стать ядрами заповедания при улучшении некоторых характеристик (к примеру, отключение ландшафтного освещения, установка шумозащитных экранов на ул. Косыгина, очистка территории от мусора и т. д.). Площадь таких потенциальных участков составляет 16,8% от площади заказника. Таким образом, общая площадь ядер заповедания в заказнике может составить почти треть его площади (рис. 6).

Разработанная нами структура АИС позволяет визуализировать полученные пространственные результаты, дополнять ее статистическими, нормативными и др. данными, создавать интерактивную среду для управления природопользованием в целях его оптимизации.

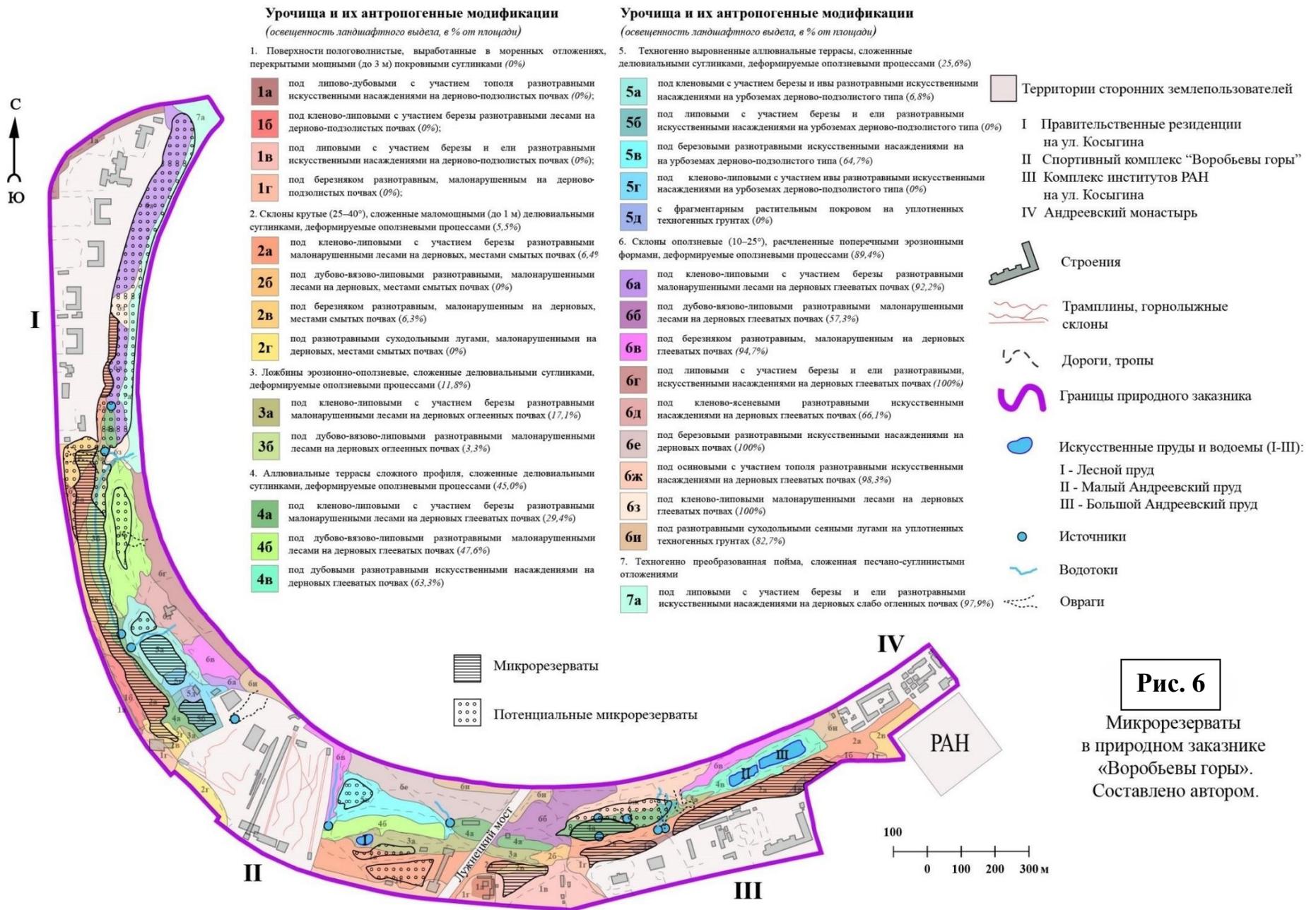


Рис. 6

Микрорезерваты в природном заказнике «Воробьевы горы». Составлено автором.

Заключение. Настоящая работа является первой попыткой использования геоэкологических подходов для пространственного анализа светового загрязнения на территории ООПТ, выявления механизмов его влияния на геосистемы и выработки возможных мероприятий по его регулированию. Световое загрязнение, как любая геоэкологическая проблема, носит системный характер и, следовательно, требует системных решений, которые используются в поисках компромисса между рекреационным и природоохранным природопользованием для обеспечения устойчивого развития изученной территории.

Проведенное исследование светового загрязнения в природном заказнике «Воробьевы горы» позволяет сделать следующие выводы:

1. Оценка светового загрязнения в городских ООПТ основывается на комплексном геоэкологическом подходе, включающем инструментальные измерения уровня и режимов освещенности и геофизической интерпретации их результатов для расчета поступления дополнительной энергии в ландшафты; использование данных дистанционного зондирования для выявления ареалов его проявления; детальное ландшафтно-экологическое обследование территории с целью выявления интенсивности и площадного распространения светового загрязнения, а также объектов природного и культурного наследия в зоне его влияния; оценку социально-экономических издержек; а также анализ технических и пространственных характеристик осветительной техники.

2. Световое загрязнение на территории г. Москвы непрерывно увеличивается в результате изменения землепользования, а также широкого использования архитектурно-художественной подсветки. Площадь неосвещенных природных пространств за 2013–2023 гг. сократилась на 11%, площадь территорий, испытывающих световое загрязнение, включая городские ООПТ, возросла на 8,5%. Среди 10 комплексных природных заказников Москвы заказник «Воробьевы горы» выделяется большой площадью засветки (44% территории) при интенсивности светового загрязнения 145 лк для уличного освещения и 18,4 тыс. лк для ландшафтного освещения (при фоновом для заказника значении 0,9 лк).

3. Избыточный свет продуцирует приток добавленной энергии в геосистемы, потенциально влияющий на их сезонную и суточную ритмику. Доля добавленной энергии светового потока от суммарной радиации в летнее время составляет 3–6%, в зимнее время – до 70%. В начале и конце вегетационного периода прирост суммарной радиации за счет добавленной энергии составляет 6,4% и 34,1% соответственно, в сумеречное время весной – 18,2%, а осенью – 44,9%.

4. Возможные пути контроля и снижения уровня светового загрязнения в заказнике включают нормативное и экономическое регулирование, технические усовершенствования режимов и спектра ландшафтного освещения (за счет исключения красно-желтого, розового и фиолетового света), сокращение периодов его использования праздничными и выходными днями, а также пространственную оптимизацию рекреационного использования путем создания

микрорезерватов – ядер заповедания для реабилитации нарушенных световым загрязнением экосистемных функций ООПТ, возможная площадь которых может достигать 30% от общей.

Список публикаций по теме диссертации в журналах, индексируемых в базах данных Scopus, Web of Science, RSCI и из дополнительного списка рецензируемых научных изданий из перечня, рекомендованного Минобрнауки России:

1. **Лукьянов Л.Е.**, Красовская Т.М. Влияние светового загрязнения на местообитания птиц на территории природного заказника «Воробьевы горы» (г. Москва) // Проблемы региональной экологии. – 2022. – № 1. – С. 101–107.
2. **Лукьянов Л.Е.**, Маркова О.И. Объекты природного и культурного наследия и эстетически ценные пейзажи на территории природного заказника «Воробьевы горы» в атласной информационной системе // ИнтерКарто. ИнтерГИС. – 2023. – Т. 29, № 2. – С. 518–535.
3. **Лукьянов Л.Е.**, Маркова О.И. Картографирование антропогенных нарушений на территории природного заказника «Воробьевы горы» (г. Москва) // ИнтерКарто. ИнтерГИС. – 2023. – Т. 29, № 2. – С. 503–517.
4. **Лукьянов Л.Е.**, Красовская Т.М. Визуальное загрязнение парковых зон городов на примере природного заказника "Воробьевы горы" в Москве // Известия Русского географического общества. – 2024. – Т. 156, № 1. – С. 60–76.
5. Красовская Т.М., **Лукьянов Л.Е.**, Тикун В.С. Проблема сохранения природоохранных функций городских заказников в условиях рекреационной нагрузки // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2024. – Т. 179, № 5. – С. 17–26.
6. **Лукьянов Л.Е.**, Красовская Т.М., Емельянова Л.Г. Геоботанический мониторинг светового загрязнения в городском ООПТ (на примере природного заказника «Воробьевы горы» г. Москвы) // Географическая среда и живые системы. – 2024. – №3. – С. 27–46.
7. **Лукьянов Л.Е.** Опыт энергетической оценки светового загрязнения (на примере природного заказника «Воробьевы горы» г. Москвы) // Географическая среда и живые системы. – 2025. – №1. – С. 27–40.

Иные публикации

8. Красовская Т.М., **Лукьянов Л.Е.** Антропогенные триггеры ритмики ландшафтов // Материалы I Белорусского географического конгресса: к 90-летию факультета географии и геоинформатики Белорусского государственного университета и 70-летию Белорусского географического общества, Минск, 8–13 апр. 2024 г. В 7 ч. – Т. 5. – Минск: БГУ Минск. – 2024. – С. 174–178.
9. Красовская Т.М., **Лукьянов Л.Е.** Проблема использования природных заказников Москвы в рекреационных целях // Труды НОЦ–Ботанический

- сад МГУ. Выпуск VIII. Рекреационная нагрузка на городскую экосистему: оценка, риски, пределы (материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, 12–13 февраля 2024 г.) – М.: Издательский дом МГУ. – 2024. – С. 142–150.
10. Красовская Т.М., **Лукьянов Л.Е.** Эстетические инновации в парковых зонах городов: pro et contra // Теоретические и прикладные проблемы ландшафтной географии. VII Мильковские чтения: материалы XIV Международной ландшафтной конференции, Воронеж, 17–21 мая 2023 г.: в 2 т. – Т. 2. – Издательский дом ВГУ Воронеж. – 2023. – С. 144–146.
 11. **Лукьянов Л.Е.**, Красовская Т.М. Изучение светового загрязнения окружающей среды на разных масштабных уровнях // Актуальные проблемы экологии и природопользования: сборник научных трудов XXII Международной научно-практической конференции, Москва, 22–24 апреля 2021 г. – Т. 1. – РУДН Москва. – 2021. – С. 318–327.
 12. **Лукьянов Л.Е.** Методика изучения светового загрязнения в городских ООПТ // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Антропогенная трансформация геопространства: меняющийся мир – штрихи к портрету», Волгоград, 11–12 декабря 2023 г. – Волгоград: Изд-во ВолГУ. – 2024. – С. 43–48.
 13. **Лукьянов Л.Е.** Угрозы природному и культурному наследию Воробьевского берега Москва-реки // Экология речных бассейнов: Труды 11-й Междунар. науч.-практ. конф., Владимир, 25–28 сентября 2023 г. – Владимир: Владим. гос. ун-т. им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – 2023. – С. 607–614.
 14. **Лукьянов Л.Е.** Микрорезерваты как форма охраны ландшафтов городских природных заказников в условиях увеличения рекреационной нагрузки // Материалы открытой городской научно-практической конференции «Природное наследие и разнообразие Москвы как часть историко-культурного и урбанистического потенциала мегаполиса», Москва, 04–05 апреля 2024 г. – М.: Лика. – 2024. – С. 95–99.

Лукьянов Лев Евгеньевич

Геоэкологическая оценка светового загрязнения
в природном заказнике «Воробьевы горы» (г. Москва)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Подписано в печать 24.09.2025

Формат 60x90 1/16. Объем: усл. печ. л. 1,5

Тираж 100 экз. Заказ № 3488

Отдел полиграфии Научной библиотеки МГУ имени М.В.Ломоносова
119192 Москва, Ломоносовский проспект 27