

Научная статья
УДК 504.055

ОПЫТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ СВЕТОВОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ (НА ПРИМЕРЕ ПРИРОДНОГО ЗАКАЗНИКА «ВОРОБЬЁВЫ ГОРЫ» Г. МОСКВЫ)

© СС ВУ Лукьянов Л. Е.

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, Российская Федерация
e-mail: lev.lykuanov@yandex.ru; ORCID: 00-0001-5294-3711

Поступила в редакцию 23.09.2024

После доработки 18.12.2024

Принята к публикации 05.02.2025

Аннотация

Цель. Разработка методики определения и оценка количества добавленной энергии при световом загрязнении ландшафтов природного заказника «Воробьёвы горы».

Процедура и методы. Проанализированы технические характеристики ландшафтного освещения в природном заказнике, при котором световые характеристики светодиодов осветительных приборов были преобразованы в энергетические, характеризующие искусственно генерируемую световую энергию в природную среду заказника. Эта энергия сравнивалась с притоком фотосинтетически активной радиации, включая и её поступление в сумеречное время, а также на начало вегетационного периода и листопада. В эти периоды при изменении освещённости происходят выраженные изменения многих внутриландшафтных процессов, особенно заметных в перестройке биоты.

Результаты. Световое загрязнение рассматривается как фактор антропогенной динамики ландшафта, т. к. оно сопряжено с поступлением энергии фотонов и тепловой энергии от осветительных приборов. Выявлены количественные значения притока добавленной энергии от систем искусственного освещения в ландшафты, потенциально влияющего на их сезонную и суточную ритмику функционирования, изменение биоразнообразия, которое наиболее часто фиксируется как следствие светового загрязнения, однако без раскрытия внутреннего механизма этого явления. В эксперименте доля добавленной энергии за счёт светового потока от суммарной солнечной радиации в летнее время составила 3–6%, в зимнее время – до 70%. В начале и конце вегетационного периода прирост суммарной радиации за счёт добавленной энергии составил 6,4% и 34,1%, что в вегетационный период влияло на сдвиги сроков начала распускания листьев деревьев и листопада.

Теоретическая и/или практическая значимость. Выявлен физический механизм воздействия светового загрязнения, лежащего в основе физиологических изменений растительного и животного мира. Выполненные на основе инструментальных измерений расчёты позволяют ставить вопрос о влиянии добавленной энергии искусственного светового потока на ритмику природных процессов, изменение биоразнообразия, почв, экзогенных геоморфологических процессов. Полученные данные могут быть использованы для организации контроля и регулирования светового загрязнения в ООПТ.

Ключевые слова: искусственное освещение, особо охраняемые природные территории, световое загрязнение, ритмика ландшафтов

Благодарности. Автор выражает глубочайшую признательность профессору географического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова Татьяне Михайловне Красовской за помощь в создании концепции исследования, проведении расчётов добавленной энергии и обсуждение полученных результатов.

DOI: 10.18384/2712-7621-2025-1-27-40

Original Article

ENERGY ESTIMATION OF LIGHT POLLUTION (THE CASE STUDY OF THE VOROBYOVY GORY NATURE RESERVE IN MOSCOW)

© CC BY L. Lukianov

*Lomonosov Moscow State University
Leninskiye Gory 1, Moscow 119991, Russian Federation
e-mail: lev.lykianov@yandex.ru; ORCID: 00-0001-5294-3711*

Received 23.09.2024

Revised 18.12.2024

Accepted 05.02.2025

Abstract

Aim. Methodology elaboration for determining and estimating the amount of the added light pollution energy to the landscapes of the Vorobyovy Gory Nature Reserve.

Methodology. Landscape lighting technical characteristics in the nature reserve were analyzed. Light characteristics of the LEDs lighting devices were converted into energy units, reflecting artificially generated light energy flux into the reserve natural environment. This energy was compared with the influx of photosynthetically active radiation, including its influx at dusk, as well as at the beginning of the growing season and leaf fall. During these periods, changes in lighting caused a considerable impact on many internal landscape processes, especially noticeable in biota restructuration.

Results. Light pollution is regarded as a factor of anthropogenic landscape dynamics, since it is associated with the supply of photon and thermal energy from lighting devices. Quantitative values of the added energy influx from artificial lighting systems into landscapes were identified. This potentially affects their seasonal and diurnal rhythms, changes in biodiversity which are most often recorded as a result of light pollution, however, without revealing the internal mechanism of this phenomenon. In our experiment, the added energy share due to the artificial lighting flux from the total solar radiation in the summer was 3–6%, in winter – up to 70%. At the beginning and at the end of the growing season, the increase in total radiation due to the added energy amounted to 6.4% and 34.1%. During the growing season, it affected shifts in the start time of tree leaf blooming and leaf fall.

Research implications. The theoretical and/or practical significance lies in identification of physics of light pollution impact process underlining physiological changes in the plant and animal world. Assessment based on instrumental measurements allows us to raise the question of the artificial light added energy impact on natural processes rhythm, changes in biodiversity, soils, and exogenous geomorphological processes. The data obtained may be used to manage light pollution control and regulation in protected areas

Keywords: artificial lighting, specially protected natural areas, light pollution, landscapes rhythms

Acknowledgments. The author expresses his deep gratitude to the professor of the Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, T. M. Krasovskaya for her help in creating the research concept, the added energy flux assessment, and discussing the results.

DOI: 10.18384/2712-7621-2025-1-27-40

ВВЕДЕНИЕ

Ритмика природных процессов является универсальной экосистемной функцией. Пространственно-временная ритмичность природных процессов, связанных с астрономическими, геологическими и другими ритмами, разнообразна — от планетарных геологических ритмов глобального масштаба до суточных региональных и локальных. Самыми известными проявлениями ритмичности природных процессов, отражающимися на

динамике ландшафтов, являются сезонные и суточные изменения. Появление этих ритмов обусловлено циклическим поступлением солнечной энергии. Вследствие этого на протяжении 24 ч. в ландшафте меняются микроклиматические характеристики, физиология растений и животных (циркадные ритмы), интенсивность внутрипочвенных процессов и т. д. [1; 16]. Для проявления изменений в ландшафтах в процессе сезонной ритмики необходим относительно протяжённый период, зависящий от интенсивности поступления

солнечной радиации (географической широты, особенностей рельефа и др.). В этот период происходят выраженные колебания изменений климатических, биогеохимических и др. характеристик. В средних широтах сезонными ритмами обусловлены две основных фенофазы растительного покрова: вегетации и покоя, разделённые переходными состояниями (бутонизация, распускание листьев и листопад), а также сезонное изменение видового состава орнитофауны, интенсивности процессов разложения органического вещества в почвах и т. д. Суточные ритмы также сопряжены с изменениями температурного режима, влажности, циркадных ритмов биоты и т. д., наличием коротких переходных периодов – сумерками.

Антропогенное воздействие на ландшафты затрагивает не только изменение их физико-химических и биотических характеристик, но и ритмику их функционирования, постепенно приводя к изменению исходных характеристик ландшафта, наиболее очевидным из которых является увеличение чистой первичной продукции за счёт удлинения вегетационного периода. На суточное состояние ландшафтов и фазы их сезонных изменений, контролируемых притоком солнечной энергии, оказывает определённое влияние световое загрязнение, наиболее заметное на изменении циркадных ритмов биоты [11; 26]. Световое загрязнение может рассматриваться как фактор антропогенной динамики ландшафта, т. к. оно сопряжено с поступлением энергии фотонов и тепловой энергии от осветительных устройств.

В. И. Вернадский, рассматривая проблему устойчивого состояния биосферы, заметил, что оно достигается в результате установления динамических физико-химических равновесий, которое нарушается чуждыми данному состоянию проявлениями энергии [3].

Неконтролируемый рост светового загрязнения наиболее чётко прослеживается в урбанизированных районах Земли и представляет собой угрозу для здоровья человека и нормального функционирования экосистем, вызванных среди прочего изменением ритмики освещённости [22; 28; 29]. Наиболее полно влияние светового загрязнения изучено в отношении изменения обмена веществ у человека. Расширяются исследования влияния светового загрязнения на птиц, летучих мышей, морских черепаха, насекомых и т. д. [19; 25]. При этом

сопряжённые изменения в ландшафтах в целом практически не изучены, хотя можно считать, что они транслируются через растительный покров, преобразующий энергетические потоки в ландшафтах [27]. Подобные изменения потоков энергии могут представлять интерес для моделирования влияния интенсивного потепления климата на ландшафты и их экосистемные функции. Это обстоятельство позволяет рассматривать эту проблему как геоэкологическую в контексте воздействия на ландшафты не только техногенных факторов [6], но и климатических изменений [14].

В связи с этим целью исследования стала разработка методики определения и оценка количества добавленной энергии при световом загрязнении ландшафтов природного заказника «Воробьёвы горы», меняющем ритмику их функционирования.

ТЕРРИТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Заказник «Воробьёвы горы» расположен в г. Москве и тянется узкой дугой (ширина до 400 м) вдоль р. Москвы от устья р. Сетунь до Андреевского монастыря (рис. 1). Площадь заказника – 137,5 га. Связи с другими элементами зелёной инфраструктуры города не имеется, т. к. заказник со всех сторон окружён транспортными магистралями. В заказнике обитает большое число видов (более 70) растений и животных, внесённых в Красную книгу г. Москвы; также там находится 14 объектов культурного наследия, 5 из которых являются памятниками федерального значения [5].

Территория Воробьёвых гор в 1987 г. получила статус памятника природы геологического характера, а в 1998 г. стала природным заказником регионального значения. В 2013 г. территория заказника была передана в безвозмездное пользование ЦПКиО «Парк Горького», что привело к росту антропогенной нагрузки, обусловленной внедрением элементов благоустройства (ландшафтное освещение¹,

¹ Ландшафтное освещение – это система осветительных приборов, устанавливаемых на территории садовых участков или парков с декоративными целями (подчёркивание красоты отдельных элементов ландшафта, создание акцентов и т. д.). В природном заказнике «Воробьёвы горы» ландшафтное освещение было установлено в 2018 г. с целью «подчеркнуть ценность природного заказника как знакового элемента природного каркаса Москвы» (См.: Проект ландшафтной

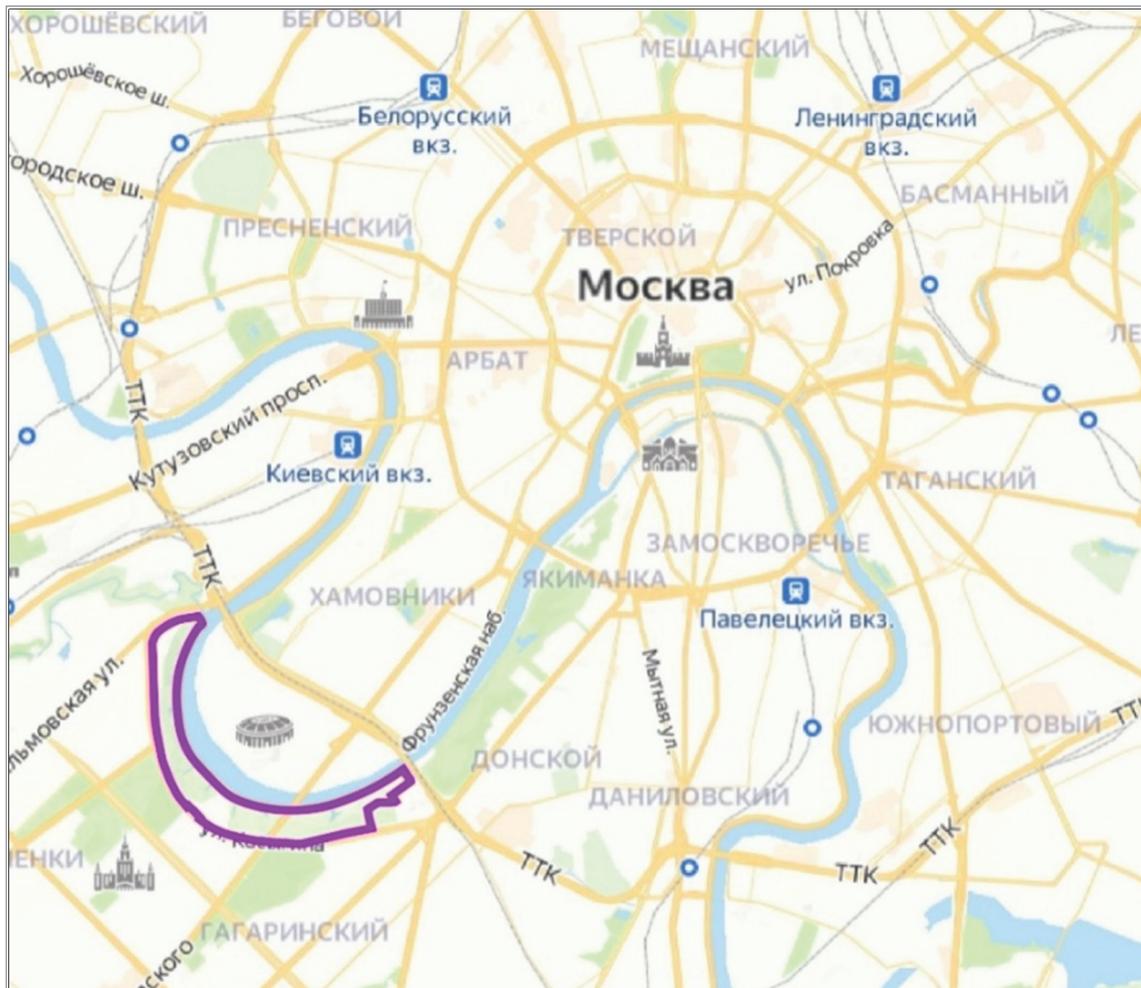


Рис. 1 / Fig. 1. Расположение природного заказника «Воробьёвы горы» в пределах г. Москвы / Location of the Vorobyovy Gory Nature Reserve within Moscow

Источник: Яндекс Карты [Электронный ресурс]. URL: <https://yandex.ru/maps/213/moscow> (дата обращения: 03.02.2025)

установка билбордов), вырубкой древостоя под строительство спортивных сооружений и т. п., что входит в противоречие с основными целями и задачами ООПТ¹, но стимулирует её рекреационное использование. В связи с этим в заказнике усугубились проблемы шумового и визуального загрязнения.

Исследования включали полевые измерения интенсивности светового потока (люксметр СЕМ ДТ-1301) на высоте 1,5 м тестовой площадки, геоботанических характеристик освещаемых участков с выявлением призна-

подсветки разработают для Бульварного кольца и Воробьёвых гор // ICMOS: [сайт]. URL: <https://icmos.ru/news/46036-proekt-landshaftnoy-podsvetki-razrabotayut-dlya-bulvarnogo-koltsa-i-vorobevykh-gor> (дата обращения 03.02.2025).

¹ 27 декабря 2024 г., согласно постановлению Правительства Москвы № 3160-ПП, заказник получил статус особо охраняемой зелёной территории (ООЗТ).

ков потенциальной угрозы биоразнообразию, а также памятникам природы и культуры местного значения (традиционным эстетически ценным пейзажам заказника, историческому облику сохранившихся строений). Выборочно осуществлялись промеры уровня освещённости на различной высоте от линзы прожектора. Измерения при ясном и облачном небе на участках с ландшафтным освещением практически не отличались, в более затенённых участках они могли различаться в зависимости от облачности в 5 раз (от 0,2 лк летом в безоблачную погоду до 1,0 лк зимой в облачную погоду), что согласуется с данными других исследователей [23]. Интенсивность искусственного светового потока варьируется в зависимости от расстояния до прожектора, тип которого изучен по их техническим характеристикам. Характеристика изменения

природных ритмов проводилась с использованием материалов тематических публикаций и собственных полевых наблюдений.

Физические характеристики уровня освещённости могут быть преобразованы в энергетические показатели мощности светового потока только при наличии технических характеристик источника освещения и освещаемой территории, поэтому в нашем исследовании был использован анализ технических характеристик светодиодов на прожекторах. Уровень освещённости в природном заказнике «Воробьёвы горы» сопоставляется с имеющимися в тематических публикациях.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСКУССТВЕННОГО ЛАНДШАФТНОГО ОСВЕЩЕНИЯ

На территории Воробьёвых гор на площади в 24 га расположены опоры ландшафтного освещения высотой около 3,75 м. Опоры располагаются в 3 ряда (в некоторых местах наблюдается скученность до 5 рядов). Всего на территории ООПТ располагается 1000 опор по 12 прожекторов на каждой на протяжении 4 км вдоль набережной (рис. 2). Среднее расстояние между опорами – 10 м. Прожектора направлены вверх, в кроны деревьев, под углом 45–60°.

Подсветка осуществляется LED-светодиодными уличными прожекторами архитектурно-художественной иллюминации мощностью 163 Вт, с углом освещённости 25°, оснащёнными многоканальными контроллерами для смены цветов. На каждом прожекторе расположено по 72 светодиода, аналогичных светодиоду ARPL-Star-3W-EPA-RGB (350mA, W/W). Проведённые нами расчёты КПД светодиодов при различных спектрах светового потока с использованием коэффициента преобразования световых величин в энергетические (ГОСТ 8.332-2013) показали, что при мощности светодиода в 3 Вт средний КПД составляет 8% (т. е. светодиод излучает 0,24 Вт в виде света и 2,76 Вт в виде тепла).

Ввиду пересечённого характера рельефа опоры освещения установлены на разных уровнях: в днищах оврагов, на плоских участках, на бровках оползневых террас и т. д. Всё это создаёт неравномерную освещённость территории ООПТ. Где-то распространение световых потоков ограничивается холмами, и

лучи не проходят вглубь ООПТ, а где-то особенности рельефа, наоборот, способствуют вторжению лучей глубоко внутрь охраняемой территории. Ландшафтное освещение на Воробьёвых горах включается в среднем через 15 минут после захода солнца и выключается в полночь.

ЭНЕРГИЯ СВЕТОВОГО И ТЕПЛООВОГО ПОТОКОВ

При исходной мощности и КПД прожектора лишь 13 Вт расходуется на оптическое излучение. За 1 ч ($13 \text{ Вт} \times 3600 \text{ с}$) 46,8 кДж световой энергии поступает от 1 прожектора в окружающую среду, а от 12 прожекторов на 1 опоре – 561,6 кДж/час. Для всей освещённой территории заказника (все прожекторы освещают около 40 га территории) получим суммарно 561,6 МДж/час. В пересчёте на 1 м^2 кроны это составит 1400 Дж/ч (или 23 Дж/мин.). Крона дерева – объёмный объект (примерно 1 м^2), представляющий собой условную квадратную поверхность, приподнятую вверх на среднюю высоту дерева (20 м) параллельно земле и принимающую на себя энергию светового потока.

Распространение тепловой энергии отличается от распространения энергии фотонов света. Величина теплового излучения зависит от теплопроводности среды, конвекции и т. п. Оценить эти параметры в данном исследовании не представляется возможным, т. к. влияние добавленной тепловой энергии на экосистемы имеет более сложную зависимость от исходных и меняющихся характеристик ландшафтов, чем световой, что требует дополнительных исследований.

При исходной мощности прожектора (163 Вт) и КПД (8%) прожектора, а также известной доли оптического излучения получим, что около 150 Вт рассеивается в виде тепла. Тепловой поток от 1 прожектора в окружающую среду составляет 540 кДж/ч, 12 прожекторов на опоре дают 6,48 МДж/ч, а все 12 тыс. прожекторов в заказнике высвобождают 6480 МДж/ч. В пересчёте на 1 м^2 это составит 16,2 кДж/ч (или 270 Дж/мин.). Таким образом, добавленная антропогенная энергия от ландшафтного освещения составляет: 270 Дж тепла + 23 Дж света = 293 Дж/мин. дополнительной энергии на 1 м^2 .



Рис. 2 / Fig. 2. Ландшафтное освещение на Воробьёвых горах: *a* – опора ландшафтного освещения с прожекторами; *b* – работающее ландшафтное освещение в зимнее время; *c* – пространственное распространение опор и засветки ландшафтного освещения / Landscape lighting in the Vorobyovy Gory Nature Reserve: *a* – landscape lighting pole with spotlights; *b* – landscape lighting in winter; *c* – spatial distribution of landscape lighting illumination and its poles.

Источник: Фото и картографический материал автора

СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ АНТРОПОГЕННОГО ПОСТУПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ

Как было отмечено выше, ландшафтное освещение включается через 15 мин. после захода солнца и работает до полуночи, что

при различной продолжительности светового дня и определяет продолжительность поступления добавленной энергии. На основании известного времени включения и времени работы освещения в минутах было рассчитано количество добавленной световой энергии для каждого дня в году (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

Количество добавленной световой энергии в зависимости от продолжительности светового дня в течение года, в кДж/м² / The amount of additional light energy depending on the length of daylight during the year, kJ/m²

Дата	Янв.	Фев.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сент.	Окт.	Ноя.	Дек.
1	10,56	9,32	7,91	6,46	5,06	3,80	3,40	4,30	5,93	7,75	9,50	10,63
2	10,53	9,27	7,87	6,42	5,01	3,77	3,43	4,35	6,00	7,80	9,55	10,65
3	10,51	9,20	7,82	6,37	4,97	3,73	3,43	4,39	6,05	7,87	9,59	10,67
4	10,49	9,15	7,77	6,33	4,92	3,70	3,45	4,44	6,12	7,94	9,64	10,70
5	10,47	9,11	7,73	6,28	4,88	3,68	3,45	4,49	6,19	7,98	9,68	10,70
6	10,42	9,06	7,68	6,23	4,83	3,66	3,47	4,53	6,23	8,05	9,73	10,72
7	10,40	9,02	7,64	6,19	4,78	3,63	3,50	4,58	6,30	8,10	9,78	10,74
8	10,35	8,97	7,59	6,14	4,76	3,59	3,50	4,62	6,35	8,17	9,82	10,74
9	10,33	8,90	7,54	6,10	4,72	3,57	3,52	4,67	6,42	8,21	9,87	10,76
10	10,28	8,86	7,48	6,05	4,65	3,54	3,54	4,74	6,49	8,28	9,91	10,76
11	10,26	8,81	7,43	6,00	4,62	3,52	3,57	4,78	6,53	8,33	9,96	10,79
12	10,21	8,76	7,38	5,96	4,58	3,52	3,59	4,83	6,60	8,40	10,01	10,79
13	10,17	8,72	7,34	5,91	4,53	3,50	3,61	4,88	6,65	8,46	10,05	10,79
14	10,14	8,67	7,29	5,87	4,49	3,47	3,66	4,92	6,72	8,51	10,07	10,79
15	10,10	8,60	7,25	5,82	4,44	3,45	3,68	4,99	6,79	8,58	10,12	10,79
16	10,05	8,56	7,20	5,77	4,39	3,45	3,70	5,04	6,83	8,63	10,17	10,79
17	10,01	8,51	7,15	5,70	4,37	3,43	3,73	5,08	6,90	8,69	10,19	10,79
18	9,96	8,46	7,11	5,66	4,30	3,43	3,75	5,15	6,97	8,74	10,24	10,79
19	9,91	8,42	7,06	5,61	4,28	3,40	3,80	5,20	7,02	8,79	10,28	10,79
20	9,87	8,37	7,02	5,57	4,23	3,40	3,82	5,24	7,08	8,86	10,30	10,79
21	9,84	8,30	6,97	5,52	4,19	3,40	3,86	5,31	7,13	8,90	10,35	10,76
22	9,80	8,26	6,92	5,47	4,14	3,38	3,89	5,36	7,20	8,97	10,37	10,76
23	9,75	8,21	6,88	5,43	4,12	3,38	3,93	5,43	7,27	9,02	10,42	10,74
24	9,71	8,17	6,83	5,38	4,07	3,38	3,96	5,47	7,31	9,06	10,44	10,74
25	9,64	8,12	6,79	5,34	4,05	3,38	4,00	5,54	7,38	9,13	10,47	10,72
26	9,59	8,07	6,74	5,29	4,00	3,38	4,05	5,59	7,45	9,18	10,51	10,70
27	9,55	8,03	6,69	5,24	3,96	3,38	4,09	5,66	7,50	9,22	10,53	10,70
28	9,50	7,96	6,65	5,20	3,93	3,38	4,12	5,70	7,57	9,29	10,56	10,67
29	9,45	-	6,60	5,15	3,89	3,40	4,16	5,77	7,61	9,34	10,58	10,65
30	9,41	-	6,56	5,11	3,86	3,40	4,21	5,82	7,68	9,38	10,60	10,63
31	9,36	-	6,51	-	3,82	-	4,26	5,89	-	9,43	-	10,60
Всего	310,6	241,8	223,4	173,5	136,8	105,1	116,1	156,8	204,3	267,0	303,3	332,6

Источник: составлено автором

ТРИГГЕРНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ДОБАВЛЕННОЙ ЭНЕРГИИ В СЕЗОННОЙ РИТМИКЕ ВНУТРИЛАНДШАФТНЫХ ПРОЦЕССОВ

Энергия солнца — это электромагнитные колебания с разными длинами волн. 40–45% этой энергии приходится на область от 380 до 770 нм, т. е. видимый свет. Более короткие волны представляют собой ультрафиолетовую радиацию, более длинные — инфракрасную. Коротковолновая радиация вызывает мутагенез растений и изменяет их репродуктивные возможности, длинноволновая радиация воспринимается как тепло, и тоже оказывает влияние на растения, ускоряя или замедляя метаболические реакции [13]. Пигменты хлоропластов в листе растений способны поглощать только радиацию видимого света (380–710 нм) — фотосинтетически активную радиацию (ФАР). В умеренной зоне в летний полдень лист растения поглощает 85% видимого света, пропускает 5% и отражает 10%. Инфракрасная радиация (тепло) поглощается на 25%, пропускается на 30% и отражается на 45% [13]. Поглощение ФАР неодинаково для разных областей спектра: в спектральном составе наиболее поглощаемыми являются лучи красного и синего спектра, наименее поглощаемыми — зелёного.

Основным аккумулятором и преобразователем поступающих в ландшафты энергии является растительный покров. При этом условия произрастания растений, оптические свойства листа разных жизненных форм мало влияют на поглощение, пропускание и отражение света. Не углубляясь более в биологические характеристики использования ФАР, определим коэффициент поглощения ФАР лесными участками заказника (с преобладанием клёна, дуба, берёзы) для формирования фитомассы, опираясь на средние значения расчётов по лесным территориям с наиболее близким видовым составом — 1,15%, что соответствует аналогичным показателям для лесных систем России [2; 4; 8]. Основное поглощение света происходит в верхних ярусах растительного покрова. Энергия поглощённого света определяет ритмику ландшафтных процессов: изменяется период листопада, распускания почек, плодоношения и т. п. [17; 21; 23].

Известно, что длительность фотопериода и температурный режим оказывают прямое

влияние на фенофазы древесных пород [20]. Энергия, влияющая на изменение фотопериода, связанного с дополнительным освещением, рассчитанная нами для заказника, представлена в таблице 1. Сравним эффективность поглощения ФАР на модельной территории и приток добавленной энергии, используя данные наблюдений метеостанции МГУ [9] и представленные выше расчёты (табл. 2).

Рассмотрим подробнее количество ФАР и добавленную энергию от светового потока в условные начальные дни «перестроечного» периода в ландшафтах — т. е. в средние по Москве периоды начала распускания почек и начала листопада. При этом для разных видов эти сроки могут отличаться, как и длительность вегетационного периода, который для Москвы составляет около 150 дней [9].

Кульминационный период сезонной перестройки, связанный с распусканием почек и листопадом многих древесных пород, условно принимаем в следующие даты: 27–30 апреля и 01–04 октября. Этот процесс в вегетационный период весной обеспечивает энергия ФАР в 28 МДж/м², в период листопада — 8 МДж/м² (табл. 2). С учётом коэффициента поглощения ФАР растительным покровом, равным 1,15%, получим в эти даты энергию ФАР_{кплд} равной 322 кДж/м² и 92 кДж/м² соответственно. В свою очередь, добавленная энергия светового потока с наступлением темноты составляет в конце апреля 20,7 кДж/м², в начале октября — 31,3 кДж/м² (табл. 1).

Посчитаем, какой приток ФАР_{кплд} приходит в апреле и в октябре на 1 м² за 1 мин. За последние 4 дня апреля (3 962 мин. «света») 1 м² территории получает 322 кДж энергии, следовательно, за 1 мин. получим 81,3 Дж. За первые 4 дня октября (3 064 мин. «света») 1 м² территории получает 92 кДж энергии, значит, за 1 мин. получим 30 Дж. Добавленная энергия светового потока за 1 мин. в любое время года составляет 23 Дж.

Таким образом, в конце апреля энергия естественного светового потока вместе с добавленной энергией возрастает до 342,7 кДж/м², т. е. добавленная энергия даёт прирост 6,4% (табл. 3). В начале октября сумма ФАР равна 91,9 кДж/м², а суммарная энергия составляет 123,3 кДж/м², т. е. добавленная энергия даёт прирост 34,1%. Можно предположить, что вычисленные значения притока добавленной энергии являются триггерными

Таблица 2 / Table 2.

Сопоставление потоков ФАР (с учётом КПД) и добавленной энергии / Comparison of photosynthetically active radiation (PAR) fluxes and additional energy

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

Источник: составлено автором

Таблица 3 / Table 3

ФАР и количество добавленной энергии в рассматриваемые периоды / Photosynthetically active radiation and the amount of additional energy in the periods under review

Дата	Продолжительность естественного освещения, мин.	ФАР _{кпд} за 1 мин., Дж/м ²	ФАР _{кпд} за световой день, кДж/м ²	Продолжительность работы ландшафтного освещения, мин.	Добавленная энергия от светового потока в 1 мин., Дж/м ²	Добавленная энергия за время работы ландшафтного освещения, кДж/м ²
27.04	983	81,3	79,91	228	23	5,24
28.04	988		80,32	226		5,20
29.04	993		80,73	224		5,15
30.04	998		81,13	222		5,11
01.10	773	30	23,19	337	23	7,75
02.10	768		23,04	339		7,80
03.10	764		22,90	342		7,87
04.10	759		22,77	345		7,94

Источник: составлено автором

для ускорения «запуска» рассматриваемых фенологических процессов.

Вывод о стимулирующем сезонные фенофазы потоке добавленной энергии подтверждается экспериментальными наблюдениями. Так, наблюдения за изменением фенофаз растений в результате светового загрязнения в Словакии, Великобритании и других странах

свидетельствуют о более раннем распускании почек весной, задержке осеннего опадания листьев, увеличению фитомассы надземных частей растений при уменьшении подземной и т. п. [18; 22; 24; 27]. В Словакии на тестовых участках зафиксировано, что меняются фенофазы древесных пород: например, наступление сроков листопада у клёна белого (*Acer*

*pseudoplatanus*¹⁾ откладывается на 1 неделю на участке с интенсивностью засветки всего в 6–8,5 лк, крайне незначительном при сравнении с ландшафтной подсветкой в природном заказнике «Воробьёвы горы» [23]. В Великобритании отмечено ускорение распускания почек у берёзы повислой (*Betula pendula*) примерно на 4 дня [24]. Заметим, что интенсивность светового потока и освещаемая поверхность в обоих случаях была существенно ниже, чем на изучаемой территории [10]. Подобное заключение делают и уральские учёные, изучавшие влияние светового загрязнения на лиственницу сибирскую (*Larix sibirica*) [15].

ТРИГГЕРНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ДОБАВЛЕННОЙ ЭНЕРГИИ В СУТОЧНОЙ РИТМИКЕ ВНУТРИЛАНДШАФТНЫХ ПРОЦЕССОВ

Для определения аналогичных показателей суточного ритма в качестве примера рассмотрим время вечерних сумерек в конце апреля и начале октября. В этот «перестроечный» период наиболее выражены изменения ритмов живой природы, которые зависят от освещённости и температуры воздуха, влияющих на метаболизм в клетках живых организмов, поведенческие циклы животных. Необходимо отметить, что суточная ритмичность опреде-

ляет также и микроциркуляцию воздуха, увлажнённость и другие процессы [16].

Экспериментальные данные показывают наличие фотопериодичности у многих видов растений и животных (см. ниже). Заметим, однако, что необходимы дальнейшие натурные наблюдения за фоточувствительными видами для определения пороговых значений, которые могут быть различными для каждого из них. В работе мы провели сравнение среднего поступления ФАР в экосистемы изучаемой территории в вечерние сумерки и величины добавленной энергии подсветки в указанные периоды (табл. 4).

Фотосинтетический аппарат растений приспособлен к использованию незначительного светового потока: у большинства растений фотосинтез начинается при мощности светового потока в 5 Вт/м² (в энергетическом выражении — 300 Дж/мин.)². Полученные данные по суммарному «энергетическому обеспечению» функционирования биоты в минуту сумеречного времени сопоставимы с таковыми в течение светового дня, поскольку физиологически активная длина дня включает и сумеречное время [7]. Длительность вечерних сумерек в рассматриваемый весенний период составляет 42–43 мин., в осенний — 36–37 мин., однако через 15 минут после захода солнца включается ландшафтное освещение.

Таблица 4 / Table 4

ФАР и количество добавленной энергии во время вечерних сумерек / Photosynthetically active radiation and the amount of additional energy during evening twilight

Дата	Время работы ландшафтного освещения в сумерки, мин.	ФАР _{кпл} в мин., Дж/м ²	ФАР _{кпл} в сумерки, кДж/м ²	Добавленная энергия от светового потока в сумерки, кДж/м ²	Суммарная энергия в мин., кДж/м ²
27.04	27	81,3	3,41	0,62	4,03
28.04	28		3,5	0,64	4,14
29.04	28		3,5	0,64	4,14
30.04	28		3,5	0,64	4,14
01.10	22	30	1,11	0,50	1,61
02.10	21		1,08	0,48	1,56
03.10	22		1,11	0,50	1,61
04.10	22		1,11	0,50	1,61

Источник: составлено автором

¹ Искусственные посадки *Acer pseudoplatanus* встречаются в парках Москвы, Санкт-Петербурга и др. городов.

² Искусственное освещение растений в культивационных сооружениях защищённого грунта / Минск, 2022. URL: <https://ledfarm.by/raschyot-osveshheniya/> (дата обращения: 29.11.2023).

Добавленная энергия светового потока увеличивает его на 18,2% в весенний период и на 44,9% в осенний период, что, вероятно, является толчком для запуска циркадных ритмов биоты.

Для изучаемой территории сумеречная, сумеречно-ночная и ночная активизация известна для насекомых (поденки, бражники и др.), птиц (ушастая сова, серая неясыть), земноводных (травяная лягушка), млекопитающих (рукокрылые, мышевидные грызуны), обитающих в природном заказнике. Наблюдаемое сокращение популяции соловья обыкновенного (*Luscinia luscinia*) в заказнике может быть связано в т. ч. и со световым загрязнением: непарные самцы регулярно поют ночью, а ночное пение, вероятно, служит для привлечения самок [12]. Сокращение тёмного времени суток уменьшает их шансы. Для растений известен также феномен фотопериодизма. На территории заказника произрастает опыляемая ночными насекомыми любка двулистная (*Latanthéra Bifolia*), лилия кудреватая (*Lilium martagon*), растение «длинного дня» гвоздика Фишера (*Dianthus fischeri*) и др.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое исследование носит оценочный характер и впервые проводится для городских ООПТ. Полученные значения поступления добавленной энергии искусственного освещения раскрывают механизм воз-

действия светового загрязнения на ритмику ландшафтов и оценивают его энергетическое содержание. Результаты такого воздействия могут быть как положительными (удлинение вегетационного периода, активизация биогеохимического круговорота и др.), так и отрицательными (сокращение численности фоточувствительных видов растений и животных, биоразнообразия и др.). Для заказника вычислены ориентировочные триггерные значения поступления добавленной энергии, влияющие на сезонную (прирост суммарной радиации за счёт добавленной до 6% в летнее время, до 70% – в зимнее время) и суточную (прирост суммарной радиации за счёт добавленной энергии составил 6,4% в начале вегетационного периода и 34,1% в конце вегетационного периода) ритмику его ландшафтов. Для уточнения полученных данных необходимо расширение тематических натуральных наблюдений ландшафтов заказника в течение всего года и определения фоточувствительных видов биоты. Заслуживают внимания и исследования аналогичных изменений экзогенных геоморфологических и почвенных процессов, в перспективе – разработка комплексной программы исследований. Тем не менее полученные данные раскрывают методику организации контроля и возможного регулирования светового загрязнения в природном заказнике, что необходимо для его сохранения в качестве городского ООЗТ, а также объекта природного и культурного наследия Москвы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беручашвили Н. Л. Четыре измерения ландшафта. М: Мысль, 1986. 182 с.
2. Бурцев Д. С. Моделирование динамики продукции энергии в лесных культурах ели // Труды Санкт-Петербургского НИИ лесного хозяйства. 2013. № 1. С. 6–10.
3. Вернадский В. И. Биосфера. М.: Мысль, 1967. 376 с.
4. Дьяконов К. Н., Байбар А. С., Харитонов Т. И. Внутривековая динамика эффективности использования лесами Мещеры фотосинтетически активной радиации // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2017. № 5. С. 12–22.
5. Ефремов К. Д., Кузьмичев Е. П. Особо охраняемые природные территории города Москвы: справочник-путеводитель. М., 2013. 178 с.
6. Захаров К. В., Медведков А. А., Иванова Е. Ю. Технология геоэкологической оценки урбанизированных территорий (на примере Ближнего Подмосковья) // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2019. Т. 25. № 1. С. 352–361. DOI: 10.35595/2414-9179-2019-1-25-352-361
7. Информационно-регуляторная роль солнечной радиации в периоды сумерек в развитии и продуктивности яровых зерновых культур / И. А. Шульгин, Р. М. Вильфанд, А. И. Страшная, О. В. Береза, К. И. Павлова // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2016. № 362. С. 193–213.
8. Истомина Я. Г., Каплина Н. Ф. Динамика густоты и жизненности антропогенных дубрав южной лесостепи в связи с волновым отпадом и рубками ухода // Научные основы устойчивого управления лесами: мат-лы конф. М., 2016. С. 35–36.

9. Климат Москвы в условиях глобального потепления / Л. И. Алексеева, М. И. Варенцов, Е. В. Горбаренко, И. А. Горлач, И. Д. Еремина, Е. Ю. Жданова, А. А. Кирсанов, и др. М.: МГУ, 2017. 288 с.
10. Лукьянов Л. Е., Красовская Т. М. Влияние светового загрязнения на местообитания птиц на территории природного заказника «Воробьёвы горы» (г. Москва) // Проблемы региональной экологии. 2022. № 1. С. 101–107. DOI: 10.24412/1728-323X-2022-1-101-107
11. Лукьянов Л. Е., Красовская Т. М. Изучение светового загрязнения окружающей среды на разных масштабных уровнях // Актуальные проблемы экологии и природопользования: сб. конф. / отв. ред. Т. Н. Ледашева М.: РУДН, 2021. С. 318–327.
12. Лукьянов Л. Е., Красовская Т. М., Емельянова Л. Г. Геоботанический мониторинг светового загрязнения в городском ООПТ (на примере природного заказника «Воробьёвы горы» г. Москвы) // Географическая среда и живые системы. 2024. № 3. С. 47–61. DOI: 10.18384/2712-7621-2024-3-47-61
13. Малкина И. С. Световые кривые фотосинтеза подростов лиственных пород // Световой режим, фотосинтез и продуктивность леса / отв. ред. Ю. Л. Цельникер. М.: Наука, 1967. С. 220–231.
14. Медведков А. А. Геоэкологические проблемы в контексте климатических изменений: теоретический анализ и региональные последствия // Известия РАН. Серия географическая. 2024. Т. 88. № 3. С. 263–280. DOI: 10.31857/S2587556624030011
15. Соловьева М. В., Бунькова В. П. Влияние уличного освещения на объекты озеленения // Вестник биотехнологии. 2020. № 1. С. 1–6.
16. Солнцев Н. А. Учение о ландшафте (избранные труды). М.: МГУ, 2001. 384 с.
17. Artificial light at night advances reproductive phenology and reduces reproductive capacity of a wild plant / Shuo Wang, Zhihui Wang, Lu Xiao, Hongxiang Zhang, Yanjie Liu, et al. // bioRxiv 2022. DOI: 10.1101/2022.12.11.519667
18. Artificial light at night promotes bottom-up changes in a woodland food chain / M. Lockett, R. Rasmussen, S. K. Arndt, G. R. Hopkins, Th. M. Jones // Environmental Pollution. 2022. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.119803
19. Azam C., Le Viol I., Julien J. F. Disentangling the relative effect of light pollution, impervious surfaces and intensive agriculture on bat activity with a national-scale monitoring program // Landscape Eco. 2016. Vol. 131. P. 2471–2483.
20. Basler D., Körner C. Photoperiod and temperature responses of bud swelling and bud burst in four temperate forest trees // Tree Physiology. 2014. № 34. P. 377–388. DOI: 10.1093/treephys/tpu021
21. Ecological effects of artificial light at night on wild plants / J. Bennie, T. Davies, D. Cruse, K. Gaston // Journal of Ecology. 2016. № 104. P. 611–620.
22. Editorial: Effects of Artificial Light at Night on Organisms: From Mechanisms to Function / A. A. Ríos-Chelén, J. N. Phillips, G. L. Patricelli, D. M. Dominoni // Frontiers in Ecology and Evolution. 2022. DOI: 10.3389/fevo.2022.896460
23. Effects of light pollution on tree phenology in the urban environment / J. Škvareninová, M. Tuharska, J. Skvarenina, D. Babalova, L. Slobodnikova, B. Slobodnik, H. Stredova, et al. // Moravian Geographic Reports. 2017. Vol. 25. P. 282–290.
24. Light pollution is associated with earlier tree budburst across the United Kingdom / R. H. Ffrench-Constant, R. Somers-Yeates, J. Bennie, T. Economou, D. Hodgson, A. Spalding, P. K. McGregor // Proceedings of the Royal Society. 2016. DOI: 10.1098/rspb.2016.0813
25. Light pollution is a driver of insect declines / A. Owens, P. Cochard, J. Durrant, B. Farnworth, E. Perkin, B. Seymoure // Biological Conservation. 2020. Vol. 241. DOI: 10.1016/j.biocon.2019.108259
26. Longcore T., Rich C. Ecological Light Pollution // Frontiers in Ecology and the Environment. 2004. № 2. P. 191–198.
27. Mayer-Pinto M., Jones Th. M., Swearer S. Light pollution: a landscape-scale issue requiring cross-realm consideration // Environment Preprint. 2021. DOI: 10.14324/111.444/000103.v1
28. 11 Pressing Research Questions on How Light Pollution Affects Biodiversity / F. Hölker, J. Bolliger, T. W. Davies, S. Giavi, A. Jechow, G. Kalinkat, T. Longcore, et al. // Frontiers in Ecology and Evolution. 2021. DOI: 10.3389/fevo.2021.767177
29. Worldwide increase in artificial light at night around protected areas and within biodiversity hotspots / A. Guetté, L. Godet, M. Juigner, M. Robin // Biological Conservation. 2018. Vol. 223. P. 97–103.

REFERENCES

1. Beruchashvili N. L. *Chetyre izmereniya landshafta* [Four Dimensions of Landscape]. Moscow, Mysl Publ., 1986. 182 p.
2. Burtsev D. S. [Modeling the Dynamics of Energy Production in Spruce Forest Cultures]. In: *Trudy Sankt-Peterburgskogo NII lesnogo khozyaystva* [Proceedings of the St. Petersburg Forestry Research Institute], 2013, no. 1, pp. 6–10.
3. Vernadsky V. I. *Biosfera* [Biosphere]. Moscow, Mysl Publ., 1967. 376 p.
4. Dyakonov K. N., Baibar A. S., Kharitonova T. I. [Intra-century Dynamics of the Efficiency of Use of Photosynthetically Active Radiation by Meshchera Forests]. In: *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya* [Bulletin of Moscow University. Series 5. Geography], 2017, no. 5, pp. 12–22.

5. Efremov K. D., Kuzmichev E. P. *Osobo okhranyayemaya prirodnyaya territoriya goroda Moskvy: spravochnik-putevoditel* [Specially protected natural areas of the city of Moscow: a reference book and guide]. Moscow, 2013. 178 p.
6. Zakharov K. V., Medvedkov A. A., Ivanova E. Yu. [Technology of geoecological assessment of urbanized territories (on the example of the Near Moscow Region)]. In: *InterKarto. InterGIS* [InterCarto. InterGIS], 2019, vol. 25, no. 1, pp. 352–361. DOI: 10.35595/2414-9179-2019-1-25-352-361
7. Shulgin I. A., Vilfand R. M., Strashnaya A. I., Berеза O. V., Pavlova K. I. [Information and regulatory role of solar radiation during twilight periods in the development and productivity of spring grain crops]. In: *Gidrometeorologicheskiye issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological research and forecasts], 2016, no. 362, pp. 193–213.
8. Istomina Ya. G., Kaplina N. F. [Dynamics of density and vitality of anthropogenic oak groves of the southern forest-steppe in connection with wave mortality and thinning]. In: *Nauchnyye osnovy upravleniya lesami* [Scientific foundations of sustainable forest management]. Moscow, 2016, pp. 35–36.
9. Alekseeva L. I., Varentsov M. I., Gorbarenko E. V., Gorlach I. A., Eremina I. D., Zhdanova E. Yu., Kirsanov A. A., et al. *Klimat Moskvy v usloviyakh global'nogo potepeniya* [Climate of Moscow under the conditions of global warming]. Moscow, Moscow University Publ., 2017. 288 p.
10. Lukyanov L. E., Krasovskaya T. M. [The influence of light pollution on bird habitats in the territory of the Vorobyovy Gory nature reserve (Moscow)]. In: *Problemy regionalnoy ekologii* [Problems of regional ecology], 2022, no. 1, pp. 101–107. DOI: 10.24412/1728-323X-2022-1-101-107
11. Lukyanov L. E., Krasovskaya T. M. [Study of light pollution of the environment at different scale levels]. In: Ledashcheva T. N., ed. *Aktualnyye problemy ekologii i prirodopolzovaniya* [Actual problems of ecology and nature management]. Moscow, RUDN Publ., 2021, pp. 318–327.
12. Lukyanov L. E., Krasovskaya T. M., Emelyanova L. G. [Geobotanical monitoring of light pollution in an urban protected area (using the Vorobyovy Gory nature reserve in Moscow as an example)]. In: *Geograficheskaya sreda i zhivyye sistemy* [Geographical environment and living systems], 2024, no. 3, pp. 47–61. DOI: 10.18384/2712-7621-2024-3-47-61
13. Malkina I. S. [Light curves of photosynthesis of deciduous undergrowth]. In: Tselniker Yu. L., ed. *Svetovoy rezhim, fotosintez i produktivnost lesa* [Light regime, photosynthesis and forest productivity]. Moscow, Nauka Publ., 1967, pp. 220–231.
14. Medvedkov A. A. [Geoecological problems in the context of climate change: theoretical analysis and regional consequences]. In: *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical series], 2024, vol. 88, no. 3, pp. 263–280. DOI: 10.31857/S2587556624030011
15. Solovieva M. V., Bunkova V. P. [The influence of street lighting on landscaping objects]. In: [Bulletin of Biotechnology], 2020, no. 1, p. 1–6.
16. Solntsev N. A. *Obucheniye o landshafte (izbrannyye trudy)* [Landscape Studies (Selected Works)]. Moscow, Moscow University Publ., 2001. 384 p.
17. Shuo Wang, Zhihui Wang, Lu Xiao, Hongxiang Zhang, Yanjie Liu, et al. *Artificial light at night advances reproductive phenology and reduces reproductive capacity of a wild plant*. In: *bioRxiv*, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1101/2022.12.11.519667>
18. Lockett M., Rasmussen R., Arndt S. K., Hopkins G. R., Jones Th. M. Artificial light at night promotes bottom-up changes in a woodland food chain. In: *Environmental Pollution*, 2022. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.119803
19. Azam C., Le Viol I., Julien J. F. Disentangling the relative effect of light pollution, impervious surfaces and intensive agriculture on bat activity with a national-scale monitoring program. In: *Landscape Eco*, 2016, vol. 131, pp. 2471–2483.
20. Basler D., Körner C. Photoperiod and temperature responses of bud swelling and bud burst in four temperate forest trees. In: *Tree Physiology*, 2014, no. 34, pp. 377–388. DOI: 10.1093/treephys/tpu021
21. Bennie J., Davies T., Cruse D., Gaston K. Ecological effects of artificial light at night on wild plants. In: *Journal of Ecology*, 2016, no. 104, pp. 611–620.
22. Ríos-Chelén A. A., Phillips J. N., Patricelli G. L., Dominoni D. M. Editorial: Effects of Artificial Light at Night on Organisms: From Mechanisms to Function. In: *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2022. DOI: 10.3389/fevo.2022.896460
23. Škvareninová J., Tuharska M., Skvarenina J., Babalova D., Slobodnikova L., Slobodnik B., Stredova H., et al. Effects of light pollution on tree phenology in the urban environment. In: *Moravian Geographic Reports*, 2017, vol. 25, pp. 282–290.
24. Ffrench-Constant R. H., Somers-Yeates R., Bennie J., Economou T., Hodgson D., Spalding A., McGregor P. K. Light pollution is associated with earlier tree budburst across the United Kingdom. In: *Proceedings of the Royal Society*, 2016. DOI: 10.1098/rspb.2016.0813
25. Owens A., Cochard P., Durrant J., Farnworth B., Perkin E., Seymoure B. Light pollution is a driver of insect declines. In: *Biological Conservation*, 2020, vol. 241. DOI: 10.1016/j.biocon.2019.108259
26. Longcore T., Rich C. Ecological Light Pollution. In: *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2004, no. 2, pp. 191–198.
27. Mayer-Pinto M., Jones Th. M., Swearer S. Light pollution: a landscape-scale issue requiring cross-realm consideration. In: *Environment Preprint*, 2021. DOI: 10.14324/111.444/000103.v1

28. Hölker F., Bolliger J., Davies T. W., Giavi S., Jechow A., Kalinkat G., Longcore T., et al. 11 Pressing Research Questions on How Light Pollution Affects Biodiversity. In: *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2021. DOI: 10.3389/fevo.2021.767177
29. Guetté A., Godet L., Juigner M., Robin M. Worldwide increase in artificial light at night around protected areas and within biodiversity hotspots. In: *Biological Conservation*, 2018, vol. 223, pp. 97–103.
-

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Лукьянов Лев Евгеньевич – аспирант кафедры физической географии мира и геоэкологии географического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова;
e-mail: lev.lykyanov@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Lev E. Lukianov – Postgraduate student, Department of the World Physical Geography and Geoecology, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University;
e-mail: lev.lykyanov@yandex.ru

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Лукьянов Л. Е. Опыт энергетической оценки светового загрязнения (на примере природного заказника «Воробьёвы горы» г. Москвы) // Географическая среда и живые системы. 2025. № 1. С. 27–40.
DOI: 10.18384/2712-7621-2025-1-27-40

FOR CITATION

Lukianov L. E. Energy estimation of light pollution (the case study of the Vorobyovy gory nature reserve in Moscow). In: *Geographical Environment and Living Systems*, 2025, no. 1, pp. 27–40.
DOI: 10.18384/2712-7621-2025-1-27-40