

М. Б. Каган<sup>1</sup>, Н. А. Позднякова<sup>2</sup>, Т. А. Андреева<sup>3</sup>, Д. С. Тасенко<sup>4</sup>,  
Е. А. Скрипчинская<sup>5</sup>, А. И. Ракова<sup>6</sup>

## ВЗАИМОСВЯЗЬ СЕЗОННОГО ИЗМЕНЕНИЯ СВЕТОВОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ И ВЕГЕТАЦИОННОГО ИНДЕКСА НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

### АННОТАЦИЯ

Сокращение зеленых насаждений и увеличение светового загрязнения на урбанизированных территориях будет приумножаться с ростом городов. Мировое сообщество обеспокоено проблемой влияния избыточного искусственного освещения на здоровье людей и представителей городской флоры и фауны, однако методы минимизации этого влияния до сих пор не определены. Современные данные дистанционного зондирования позволяют проводить исследования для различных показателей, которые ранее были малоизученными (сами исследования были трудозатратными). В работе представлены результаты исследования коэффициента корреляции Пирсона двух показателей: вегетационного индекса и светового загрязнения по сезонам года для г. Санкт-Петербурга. В исследовании использованы данные спутников Landsat-8 и NOAA. По результатам анализа материалов построены схемы, графики и таблицы взаимосвязи данных. По итогам исследования выявлена вероятность взаимосвязи между вегетационным индексом и световым загрязнением в период отсутствия устойчивого снежного покрова на территории города. Линейная зависимость обратная, что говорит о том, что увеличение одной переменной приведет к снижению другой и наоборот. Для подтверждения достоверности исследования были выбраны семь зеленых зон в разных частях города: Таврический сад, парки Сосновка и Московский парк Победы, заказники Новоорловский, Юнтоловский и Южное побережье Невской губы, Смоленское кладбище. Территории являются посещаемыми, озелененными и по-разному освещенными. В период активного роста фитоценозов наблюдается увеличение биомассы растений, в связи с этим уменьшается световое загрязнение. При завершении вегетационного периода происходит увеличение светового загрязнения, что подтверждается проведенным исследованием.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** дистанционное зондирование Земли, вегетационный индекс, световое загрязнение, сезонность, коэффициент корреляции Пирсона

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский Государственный Университет, Институт наук о Земле, Университетская наб., д. 7-9, Санкт-Петербург, Россия, 199034, *e-mail*: [kagan.mikko@gmail.com](mailto:kagan.mikko@gmail.com)

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский Государственный Университет, Институт наук о Земле, Университетская наб., д. 7-9, Санкт-Петербург, Россия, 199034, *e-mail*: [n.pozdnyakova@spbu.ru](mailto:n.pozdnyakova@spbu.ru)

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский Государственный Университет, Институт наук о Земле, Университетская наб., д. 7-9, Санкт-Петербург, Россия, 199034, *e-mail*: [t.andreeva@spbu.ru](mailto:t.andreeva@spbu.ru)

<sup>4</sup> Северо-Кавказский Федеральный Университет, Высшая Школа Географии и Геоинформатики, ул. Пушкина, д. 1, Ставрополь, Россия, 355017, *e-mail*: [dimitri.tasenko@yandex.ru](mailto:dimitri.tasenko@yandex.ru)

<sup>5</sup> Северо-Кавказский Федеральный Университет, Высшая Школа Географии и Геоинформатики, ул. Пушкина, д. 1, Ставрополь, Россия, 355017, *e-mail*: [gerdtea@yandex.ru](mailto:gerdtea@yandex.ru)

<sup>6</sup> Санкт-Петербургский Государственный Университет, Институт наук о Земле, Университетская наб., д. 7-9, Санкт-Петербург, Россия, 199034, *e-mail*: [rakova.arina@gmail.com](mailto:rakova.arina@gmail.com)

Mikhail B. Kagan<sup>1</sup>, Natalia A. Pozdnyakova<sup>2</sup>, Tatyana A. Andreeva<sup>3</sup>, Dmitriy S. Tassenko<sup>4</sup>, Evgeniya A. Skripchinskaya<sup>5</sup>, Arina I. Rakova<sup>6</sup>

## THE RELATIONSHIP BETWEEN SEASONAL CHANGES IN LIGHT POLLUTION AND THE VEGETATION INDEX ON THE EXAMPLE OF THE CITY OF ST. PETERSBURG

### ABSTRACT

While the cities become bigger, the reduction of green areas and, in turn, the growth of light pollution in urban areas increases. The world community is concerned about the impact of superfluous artificial lighting on the health of urban people, plants and animals. However, methods for minimizing this effect have not yet been determined. Modern remote sensing data makes it possible to provide the research that was previously poorly studied or with various indicators. The paper presents the results of a study of the Pearson correlation coefficient of two indicators: the vegetation index and light pollution by season for the city of St. Petersburg. The study used data from Landsat-8 and NOAA satellites. Results of the analysis are provided with schemas, diagrams, graphs and tables. In the result of the study, the correlation between the vegetation index and light pollution during the period of absence of stable snow cover in the city was identified. The linear relationship is inverse, which means that while the one variable increases, another one decreases. Supporting reliability of the study, seven green areas were chosen in different parts of the city: Tavrichesky Garden, Sosnovka and Moskovsky Victory Parks, Novoorlovsky, Yuntolovsky and South Coast of the Neva Bay protected areas and Smolensky Cemetery. These territories are touristic, illuminated and have a large green area. During the period of active growth of phytocenoses, an increase in plant biomass is observed, and therefore light pollution decreases. At the end of the growing season, there is an increase in light pollution, which is confirmed by the conducted research.

**KEYWORDS:** Earth remote sensing, vegetation index, light pollution, seasonality, Pearson correlation coefficient

### ВВЕДЕНИЕ

Увеличение городского пространства оказывает значительное влияние на окружающую среду. На протяжении более чем ста лет качество жизни населения улучшилось за счет электрификации. Новые стандарты и требования, а также повышение комфортности среды увеличивают освещение улиц, дворов, парков и т. д. Однако, избыточное или неправильное освещение имеет негативные последствия: возникновение проблем со здоровьем у людей, разрушение экологических цепочек [Коган, 2023]. Световые пятна от искусственных источников освещения распространяются на сотни километров на открытых территориях. Повсеместное распространение декоративной подсветки домов, фонарей, рекламных

<sup>1</sup> St. Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, 7-9, Universitetskaya emb., St. Petersburg, 199034, Russia, *e-mail*: [kagan.mikko@gmail.com](mailto:kagan.mikko@gmail.com)

<sup>2</sup> St. Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, 7-9, Universitetskaya emb., St. Petersburg, 199034, Russia, *e-mail*: [n.pozdnyakova@spbu.ru](mailto:n.pozdnyakova@spbu.ru)

<sup>3</sup> St. Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, 7-9, Universitetskaya emb., St. Petersburg, 199034, Russia, *e-mail*: [t.andreeva@spbu.ru](mailto:t.andreeva@spbu.ru)

<sup>4</sup> North Caucasus Federal University, Higher School of Geography and Geoinformatics, 1, Pushkina str., Stavropol, 355017, Russia, *e-mail*: [dimitri.tassenko@yandex.ru](mailto:dimitri.tassenko@yandex.ru)

<sup>5</sup> North Caucasus Federal University, Higher School of Geography and Geoinformatics, 1, Pushkina str., Stavropol, 355017, Russia, *e-mail*: [gerdtea@yandex.ru](mailto:gerdtea@yandex.ru)

<sup>6</sup> St. Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, 7-9, Universitetskaya emb., St. Petersburg, 199034, Russia, *e-mail*: [rakova.arina@gmail.com](mailto:rakova.arina@gmail.com)

баннеров, теплиц и других источников света может стать новой экологической проблемой. В связи с этим, в конце XX в. появилось понятие светового загрязнения, означающее изменение уровня естественной освещенности в ночное время от антропогенного источника света [McGowan, 2016; Górnjak-Zimroz et al., 2024].

Освещение играет важную роль в физиологии и экологии флоры. Световое загрязнение изменяет циркадные ритмы, сезонную фенологию и т. д. [Коптов, 2019; Górnjak-Zimroz et al., 2024]. Многие представители фауны становятся уязвимыми в ночные часы из-за подсвечивания их укрытий хищникам [Жуковская, 2022]. Птицы сбиваются с ориентиров при миграциях. У людей отмечаются проблемы с качеством и режимом сна, что в свою очередь приводит к другим болезням. Следовательно, проблемы жизнедеятельности различных организмов ведут к ухудшению экологической системы в городе и климата в целом [McGowan, 2016; Голубец и др., 2021].

На данный момент в мире проблема светового загрязнения изучена слабо. Но уже сейчас исследователи выдвигают идеи о том, что этот вид загрязнения стоит приравнять к загрязнению воздуха, воды и почвы. Многие исследователи сходятся во мнении, что полностью устранить это явление невозможно, но можно уменьшить его количество [Schroer, Hölker, 2017; Hirt et al., 2023]. При направлении источника света на определенный объект вместо хаотичного освещения улицы, а также выключения света в ночные часы, когда на улице мало людей, количество избыточного искусственного света уменьшается [Скрипчинская, Романенко, 2021].

Городские власти выделяют средства на улучшение экологической ситуации на урбанизированных территориях. Появляются природные зоны или организованные места массового отдыха. Часто в рекреационных зонах рассматриваются парковые, лесопарковые и иные массивы зеленых насаждений, а также зоны рек и озер. Под тенью деревьев горожане укрываются от летнего зноя, т. к. растительность препятствует перегреву поверхности земли [Guha, Govil, 2020]. Современные автоматизированные системы управления наружным освещением (АСУНО) позволяют [Воличенко, Цурик, 2023]:

- регулировать направление освещения на растительный покров, тем самым избегая ненужного рассеивания лучей;
- включать освещение от датчика движения, что позволит сократить избыточное освещение;
- проводить мониторинг состояния светильников с возможностью отображения их на карте.

Повышенный интерес к подобным научным изысканиям заключается в изучении корреляции между вегетацией и световым загрязнением наряду с недостаточной осведомленностью общества в этой теме.

Для проведения контроля и анализа территорий внедряются новые методы — обработка данных дистанционного зондирования (ДДЗ). ДДЗ представляют современные, эффективные и оперативные методы для исследований городского пространства [Каган, 2023]. Нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI) является одним из распространенных индексных показателей, который измеряет густоту зеленой массы растительности, зафиксированной на спутниковом снимке. Для расчета индекса не требуется никаких дополнительных данных и техники, кроме самой космической съемки, и знания параметров снимков. Индекс сигнализирует об изменениях растительной массы и зависит от сезонности<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Иннотер. Электронный ресурс: <https://innoter.com/articles/zachem-nuzhen-vegetatsionnyy-indeks-ndvi/> (дата обращения 15.03.2024)

Цель исследования заключается в расчете и визуализации связи вегетационного индекса и светового загрязнения во взаимосвязи со временем года с использованием коэффициента корреляции Пирсона.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве предмета исследования выбрана территория г. Санкт-Петербурга в границах федерального субъекта. Город располагается в умеренных широтах на 60° с. ш. В летнее время наблюдается короткий ночной период, а зимой наоборот. За год в Санкт-Петербурге бывает в среднем 62 солнечных дня, поэтому на протяжении большей части года преобладают дни с облачной, пасмурной погодой и рассеянным освещением, что ограничивает получение данных дистанционного зондирования на определенные даты.

Для исследования были выбраны космические снимки со спутников Landsat-8 и JPSS (Joint Polar Satellite System), которые находятся в открытом доступе. Эти данные послужили исходным материалом для работы.

Landsat-8 — американский спутник программы Landsat, созданный совместно с NASA (National Aeronautics and Space Administration) и USGS (United States Geological Survey). Запущен 11 февраля 2013 г. и работает по сегодняшний день. Спектральные каналы с пространственным разрешением 30 м, кроме панхроматического (15 м) и дальних инфракрасных (100 м) каналов.

Критерии отбора для снимков Landsat-8:

- 1) отсутствие облачности;
- 2) полное покрытие территории города;
- 3) разные сезоны года.

Критерии отбора для снимков JPSS:

- 1) данные за определенный месяц года;
- 2) покрытие данными территории города в течение года.

На облачной платформе Google Earth Engine<sup>1</sup> получен NDVI, построенный на основе снимков Landsat-8 второго уровня обработки. В ходе получения информации производилось усреднение данных за определенный месяц, а перед экспортом проводилось изменение пространственного разрешения до 300 м. Из-за высокой облачности в определенные месяцы временной ряд был неравномерен.

Для расчета вегетационного индекса NDVI применялась формула (1):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1),$$

где NIR — отражение в ближней инфракрасной области спектра;  
RED — отражение в красной области спектра.

В инфракрасной области спектра (0,7–1,1 мкм) наблюдается область максимального отражения клеточных структур листа, а в красной области (0,6–0,7) — максимальное поглощение солнечного излучения хлорофиллом высших сосудистых растений, т. е. высокая фотосинтетическая активность (обычно связанная с густой растительностью) приводит к меньшему отражению в области видимого спектра и большему отражению в инфра-

<sup>1</sup> Google Earth Engine. Электронный ресурс: <https://earthengine.google.com/platform/> (дата обращения 24.03.2024)

красном диапазоне. Соотношение этих показателей друг к другу позволяет четко отделять растительность от других природных объектов и анализировать ее [Шовенгердт, 2010].

Данные по ночному освещению представлены на портале Earth Observation Group (EOG)<sup>1</sup>. EOG является пионером технологии ночного дистанционного зондирования, собирает ночные спутниковые снимки и создает глобальную карту ночного освещения высочайшего качества. История данных о световом загрязнении начинается с 1994 г., когда на метеорологический оборонный спутник (Defense Meteorological Satellite Program (DMSP)) был установлен оперативный датчик линейного сканирования (Operational Linescan System (OLS)). С 2012 г. запущена объединенная полярная спутниковая система NOAA (JPSS), которая включает на сегодняшний момент 3 спутника: Suomi NPP, JPSS, JPSS-2. Каждый из них имеет комплекс изображений в видимом и инфракрасном диапазоне (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite ((VIIRS)), который превосходит по качеству изображений OLS [Aubrecht, Leon, 2016; Nurbandi et al., 2016; Górnjak-Zimroz et al., 2024]. Данные поставляются в формате GeoTIFF в сжатом виде Gzip, покрытие 180W, 75N, 180E, 65S, в системе координат географическая широта/долгота, единицы измерения нВт/см<sup>2</sup>/ср с разрешением изображения 15 угловых секунд (~500 м на экваторе). Летом северное полушарие будет иметь меньшее ночное покрытие из-за более длинного дня. Покрытие ежемесячными данными будет дискретно в разное время года.

Космические аппараты серии JPSS оснащены датчиками:

- для измерения температуры, влажности и давления атмосферы: CrIS (Cross-track Infrared Sounder) и ATMS (Advanced Technology Microwave Sounders);
- для сбора данных о вертикальном и горизонтальном распространении озона в атмосфере: OMPS (Ozone Mapping and Profiler Suite);
- для изучения электромагнитного излучения: CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System);
- для съемки земной поверхности: VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite), 22-канальный радиометр.

Данные со спутника усредняются по времени и имеют показатели двух видов: за год и за месяц [Aubrecht, Leon, 2016]. Из-за северного расположения города летом наблюдается короткая ночь, в связи с этим отсутствуют данные на июнь и июль, и исследовался лишь один летний месяц — август. Наибольшие значения NDVI приобретает в летние месяцы, когда наблюдается максимум хлорофилла у растений, поэтому август является ключевым месяцем для проведения исследования.

Одни признаки выступают в роли влияющих (факторных), другие (на которые влияют) — результативных. В настоящем исследовании влияющим фактором будет показатель озелененности, а признаком, выступающим в роли результативного, будет показатель светового загрязнения.

Зависимости между признаками могут быть функциональными и корреляционными. Функциональные связи характеризуются полным соответствием между изменением факторного признака и изменением результативной величины. Каждому значению признака-фактора соответствует определенное значение результативного признака. В корреляционных связях между изменением факторного и результативного признаков нет полного соответствия. При исследовании влияния озелененности на световое загрязнение наблюдаются корреляционные признаки, величины не имеют полного соответствия, но четко прослеживается траектория трансекты [Malik et al., 2019].

<sup>1</sup> Earth Observation Group. Электронный ресурс: <https://eogdata.mines.edu/products/vnl/> (дата обращения 20.03.2024)

Корреляционный анализ используется при установлении тесноты зависимости между явлениями, процессами, объектами. Классификация корреляции:

- по направлению: 1) прямая; 2) обратная;
- по характеру: 1) функциональная; 2) статистическая;
- по величине: 1) слабая ( $0 \pm 0,4$ ); 2) средняя ( $0,4$  до  $\pm 0,7$ ); 3) сильная ( $\pm 0,7$  до  $\pm 1$ );
- по форме: 1) линейная; 2) нелинейная;
- по количеству корреляционных признаков: 1) парная; 2) множественная.

Z-преобразование Фишера используется в корреляции для преобразования коэффициента корреляции Пирсона в значение, которое можно использовать для расчета доверительного интервала. Формула (2) z-преобразования Фишера выглядит следующим образом:

$$zr = \ln ((1 + r) / (1 - r)) / 2 \quad (2),$$

Без расчета z-преобразования Фишера не представляется возможным рассчитать доверительный интервал для коэффициента корреляции Пирсона. Именно благодаря z-преобразованию мы можем утверждать о достоверности и точности полученных данных по корреляционному анализу.

Обработка снимков произведена в программе QGIS с использованием модуля корреляции. В ходе обработки данных первым шагом стало приведение снимков к одной проекции и пространственному разрешению. Проекция использовалась метрическая, система координат WGS 84 / UTM zone 35N. Пространственное разрешение приведено к 300 м, так, чтобы информация была соизмерима между собой. Вторым шагом была произведена маска на водную поверхность, чтобы эта информация не попала в расчеты. Третьим шагом построена регулярная сетка с шагом  $300 * 300$  м. Далее осуществлялся перевод прямоугольников сетки в центроиды (точки) с присвоением данных в таблицу атрибутов с растров со значениями NDVI и светового загрязнения. На последнем шаге произведен расчет коэффициента корреляции Пирсона по двум явлениям (NDVI и световое загрязнение). Пошагово этот алгоритм представлен шестью пунктами, по формулам (3–10) соответственно:

3. Расчет сумм каждого значения:

$$\dot{X}_{NDVI} \text{ и } \dot{Y}_{\text{свет}} \quad (3)$$

2. Расчет среднеарифметического значения:

$$\bar{X}_{NDVI} \text{ и } \bar{Y}_{\text{свет}}. \quad (4)$$

3. Вычисление среднеарифметического отклонения:

$$\dot{X}_{NDVI} - X_{NDVI} \quad (5)$$

$$\dot{Y}_{\text{свет}} - Y_{\text{свет}}. \quad (6)$$

4. Расчет сумм квадратов отклонений каждого явления:

$$\sum (\dot{X}_{NDVI} - X_{NDVI})^2 = a \quad (7)$$

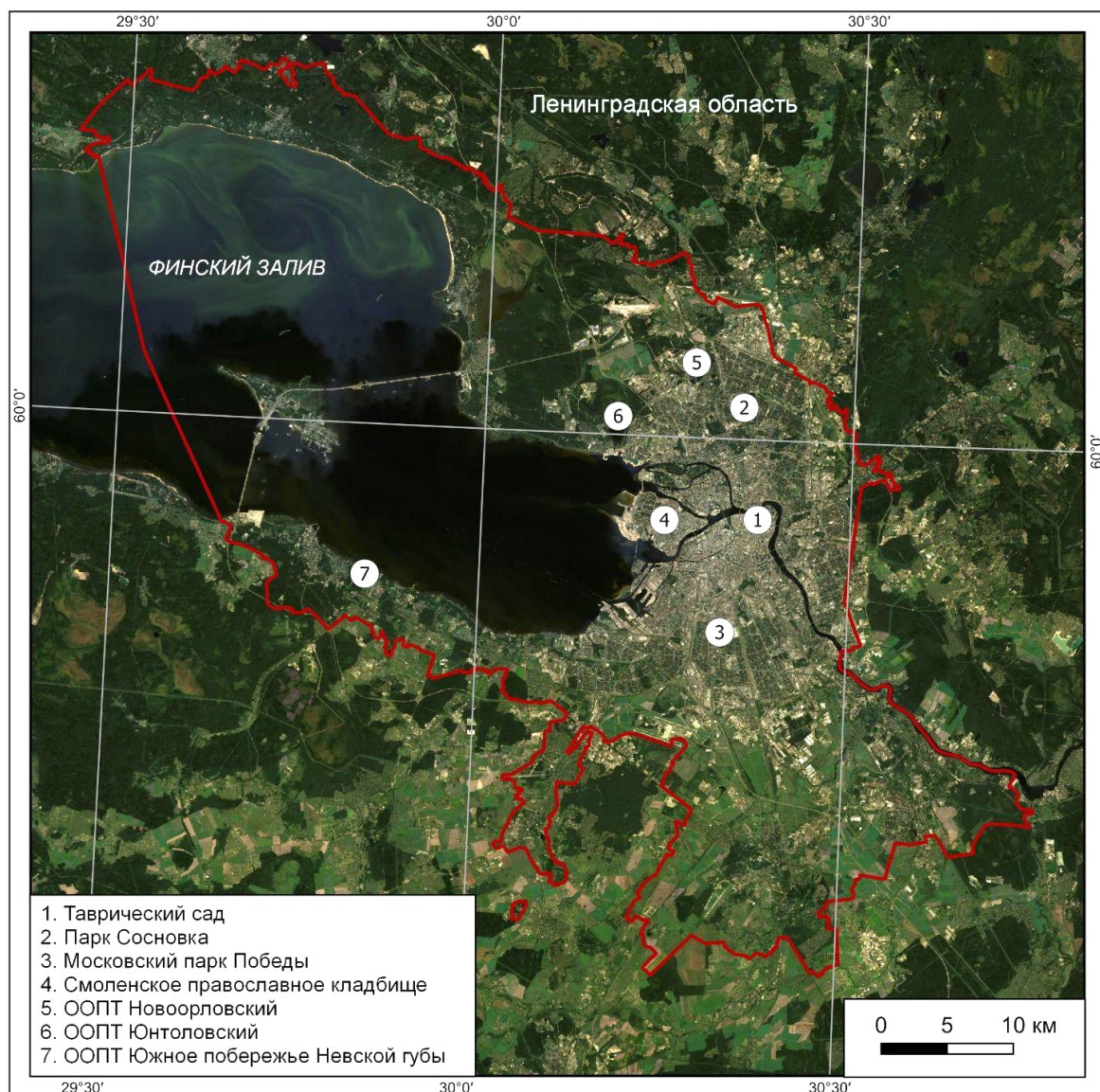
$$\sum (\dot{Y}_{\text{свет}} - Y_{\text{свет}})^2 = b \quad (8)$$

5. Расчет сумм произведений разности среднего арифметического:

$$\sum((\dot{X}_{NDVI} - X_{NDVI}) * (\dot{Y}_{\text{свет}} - Y_{\text{свет}})) = c \quad (9)$$

6. Расчет коэффициента корреляции Пирсона:

$$\frac{c}{\sqrt{(a * b)}} \quad (10)$$



*Рис. 1. Ключевые точки исследования в пределах г. Санкт-Петербурга*  
*Fig. 1. Key points of research within the city of St. Petersburg*

Для проверки исследования были выбраны 7 значимых зеленых зон на территории Санкт-Петербурга (рис. 1): в центре города выбран Таврический сад, как один из крупных зеленых объектов центральной части города, на севере — парк Сосновка, на юге — московский парк Победы. Из ООПТ (особо охраняемых природных территорий) выбраны: на севере — Новоорловский заказник, на западе — Юнтоловский заказник, на юго-западе —

Южное побережье Невской губы. Интересным объектом является Смоленское православное кладбище из-за его рекреационного значения для жителей района. Многие используют данную территорию в качестве парка. В ночное время кладбище не освещено, в отличие от многих парков и скверов в городе.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На основе рассчитанных данных ДДЗ был построен картографический материал по показателям NDVI и световому загрязнению по сезонам: апрель, август, октябрь 2022 г. и февраль 2023 г. (рис. 2, 3). При анализе данных и схем прослеживается закономерность: в зимний месяц значение яркости выше, чем в остальные периоды года. В зимние месяцы город покрыт снежным покровом. Снег является отражателем поступающего света как от источников освещения, так и от светового загрязнения территории. Повышенные значения аналогично отмечаются в апреле. Данный месяц в городе не стабилен по параметру выпадения осадков в виде снега. Предположительно, различные доли снежного и бесснежного периода могут оказывать влияния на общие данные в месяце. Наименьшие показатели света наблюдаются в период облиственности. Щит из зеленой растительности способен закрывать территорию от влияния света. По данным NDVI показатели корректные, соответствующие каждому периоду года. С началом весенне-летнего периода индекс возрастает, а затем снижается.

На основе полученных данных был произведен корреляционный анализ Пирсона (табл. 1). Наибольшее значение (в апреле 2022 г.,  $-0,649$ ) связано с тем, что в апреле уже начинается вегетационный период после зимнего периода в городе. Однако, в разные годы снег возможен и в течение всего апреля. Подобные высокие значения характерны для августа, т. к. растения в данный период находятся в стадии максимального облиствения, но цветения уже не отмечается, в связи с чем листва крон деревьев может скрывать источники освещения. Наименьшее значение в феврале закономерно, т. к. вегетационный индекс в это время года имеет минимальные значения, а также свет усиливается из-за отражения от светлой снеговой поверхности.

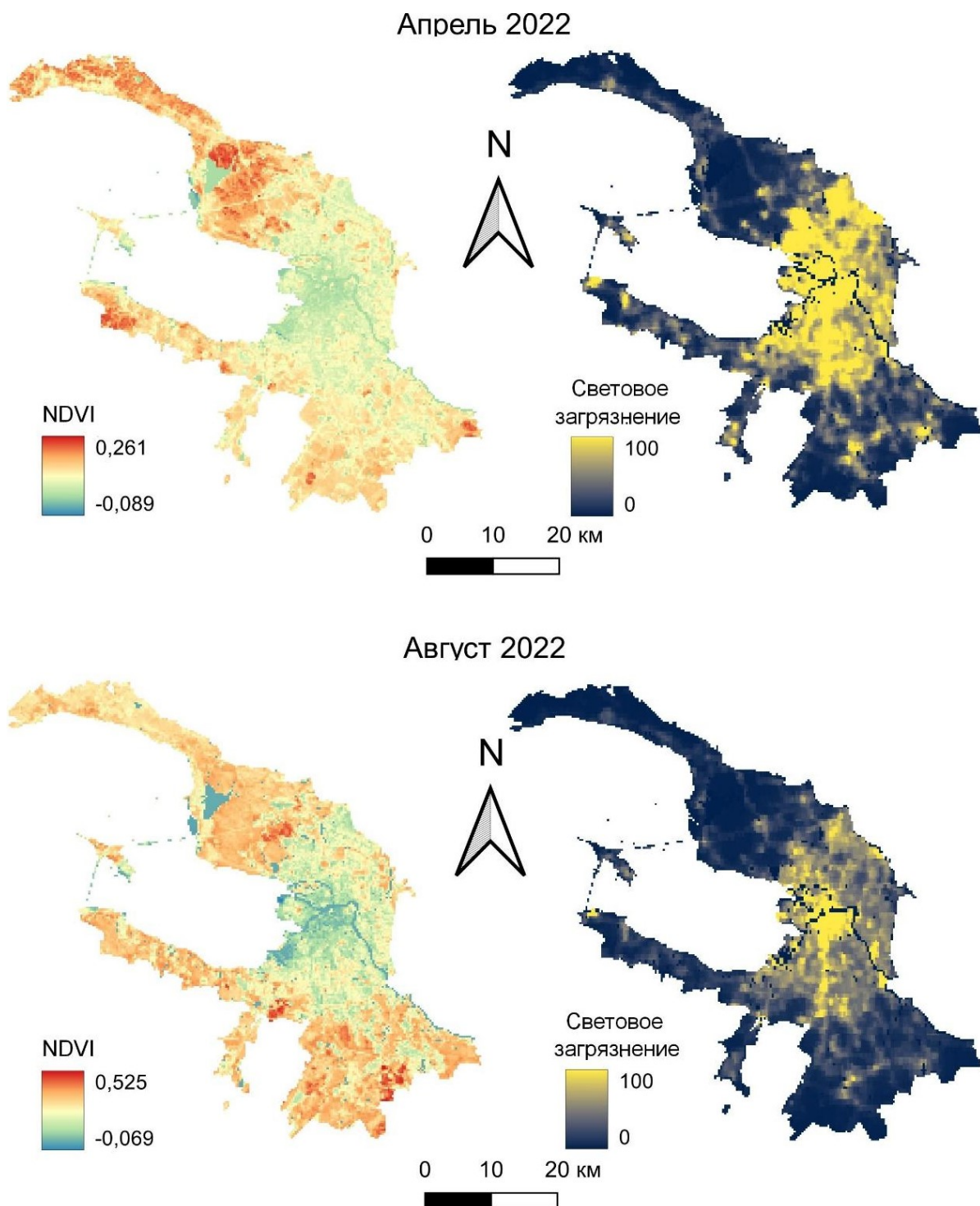
Табл. 1. Коэффициент корреляции Пирсона по месяцам  
Table 1. Pearson correlation coefficient by month

Месяц	Коэффициент корреляции Пирсона
Апрель, 2022 г.	$-0,649$
Август, 2022 г.	$-0,605$
Октябрь, 2022 г.	$-0,566$
Февраль, 2023 г.	$-0,307$

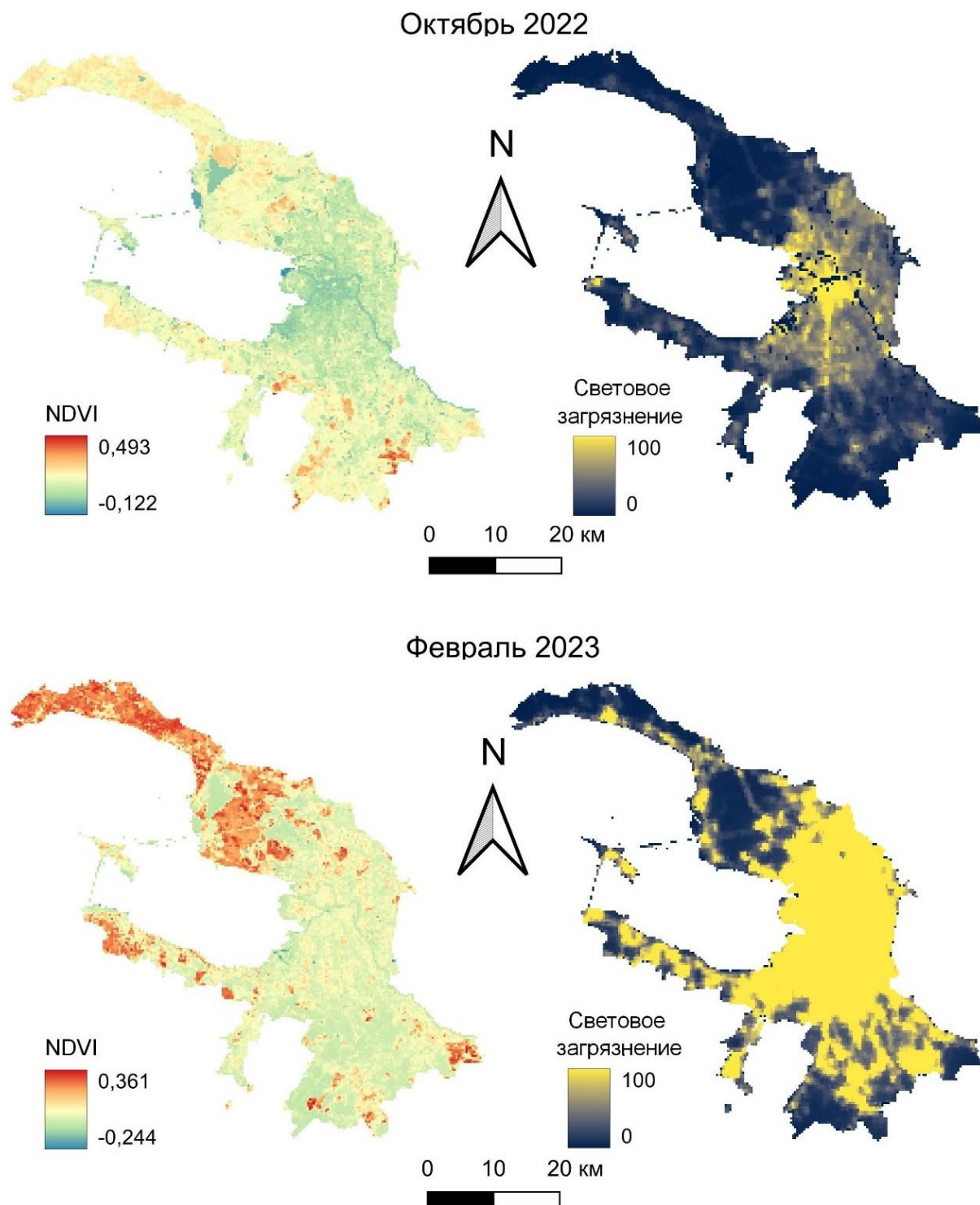
По направлению корреляция является обратной, по величине — средняя, со следующими показателями:  $-0,649$ ,  $-0,605$ ,  $-0,566$ ,  $-0,307$ . Выявлено наличие отрицательной линейной зависимости между переменными — «световым загрязнением» и «нормализованным разностным вегетационным индексом», т. е. с увеличением одной переменной другая уменьшается, и наоборот.

Коэффициент корреляции Пирсона за апрель 2022 г. равен  $-0,649$ , за август 2022 г. равен  $-0,605$ , за октябрь 2022 г. значение составляет  $-0,566$ , а за февраль 2023 г. —  $-0,307$ . Наблюдается наличие умеренной отрицательной линейной зависимости между переменными — «световое загрязнение» и «озелененность» (увеличение одной переменной

приводит к уменьшению другой). Значение коэффициента корреляции Пирсона находится в нижней границе (95 %), а значит, коэффициент является статистически значимым.



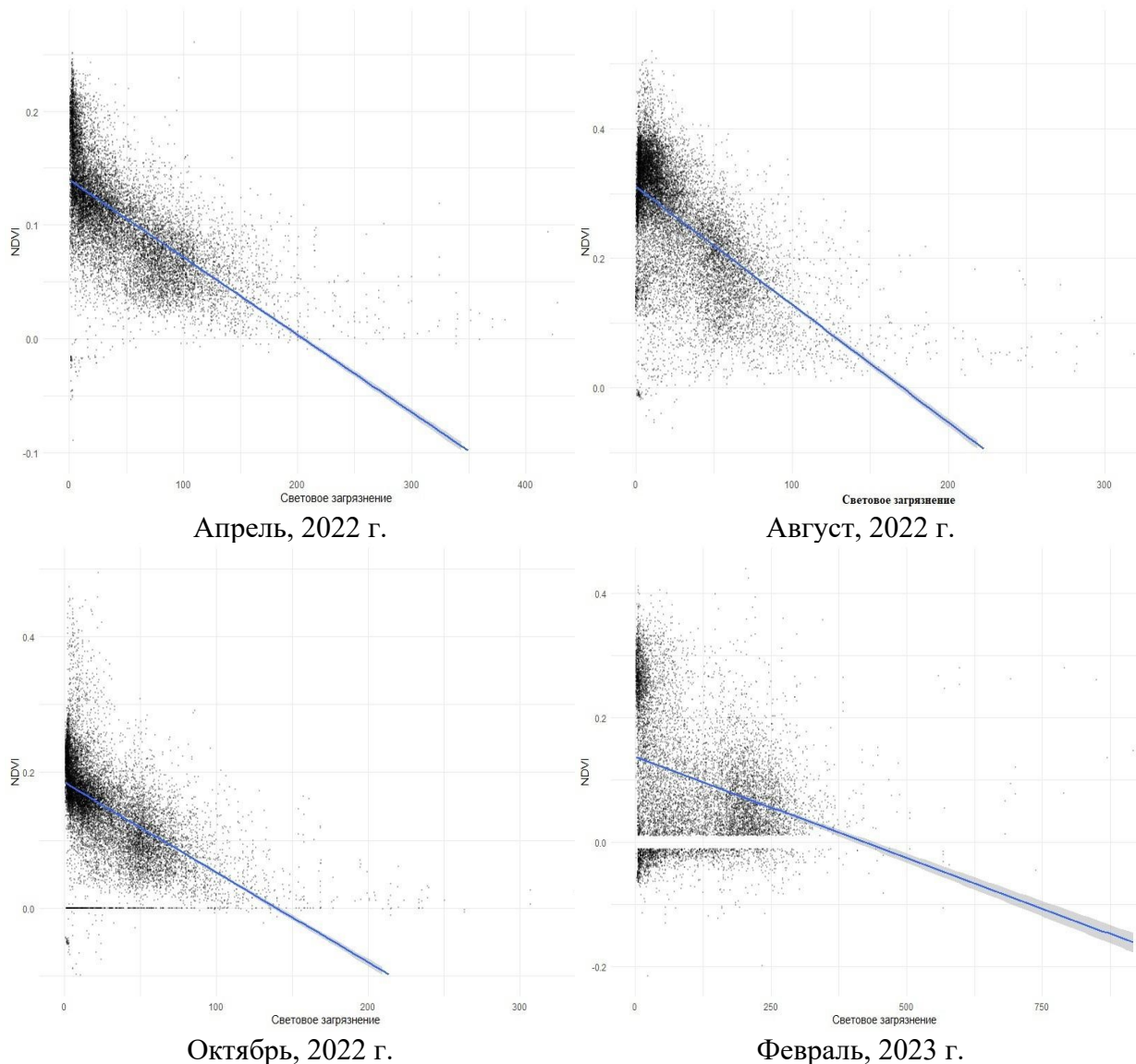
*Рис. 2. Пространственное распределение NDVI и светового загрязнения за апрель и август 2022 г.*  
*Fig. 2. Spatial distribution of NDVI and light pollution for April and August 2022*



*Рис. 3. Пространственное распределение NDVI и светового загрязнения за октябрь 2022 г. и февраль 2023 г.*

*Fig. 3. Spatial distribution of NDVI and light pollution for October 2022 and February 2023*

На рис. 4 представлена корреляционная прямая с верхними и нижними пределами. По направлению корреляция является обратной, по величине — средняя (апрель, август, октябрь 2022 г.), с показателями  $-0,649$ ,  $-0,605$ ,  $-0,566$ , и слабая (февраль, 2023 г.) с показателем  $-0,307$ .



*Рис. 4. Распределение NDVI и светового загрязнения по сезонам  
 Fig. 4. Distribution of NDVI and light pollution for seasons*

Выявлено, что  $Z$ -статистика для апреля 2022 г. равна  $-0,77$ , для августа 2022 г. составляет  $-0,70$ , в октябре 2022 г. значение равно  $-0,64$ , а в феврале 2023 г. изменяется до  $-0,31$ . Критическое значение для уровня значимости  $0,05$  составляет  $1,96$  для каждого из времен года. Исходя из значений  $Z$ -статистики, а также нижней и верхней границ доверительного интервала, можно сделать вывод о статистической значимости полученного коэффициента корреляции.

На выбранных территориях Санкт-Петербурга были рассчитаны значения NDVI и яркости (табл. 2). На основании данных, представленных в табл. 2, были построены графики (рис. 5, 6), отображающие динамику изменения вегетационного индекса и света в зависимости от времени года.

Табл. 2. Значения показателей NDVI и яркость на территории парков и кладбища  
 Table 2. NDVI values and brightness in parks and cemeteries

Парки и кладбища	Период времени							
	Апрель, 2022		Август, 2022		Октябрь, 2022		Февраль, 2023	
	значение NDVI	значение яркости	значение NDVI	значение яркости	значение NDVI	значение яркости	значение NDVI	значение яркости
Таврический сад	0,11	153,57	0,28	88,06	0,15	87,64	0,09	234,36
Парк Сосновка	0,17	32,14	0,34	21,23	0,20	23,88	0,28	51,34
Московский парк Победы	0,13	132,03	0,27	70,16	0,23	64,53	0,02	237,67
Смоленское православное кладбище	0,11	63,33	0,36	71,99	0,15	53,92	0,10	115,01
Новоорловский	0,17	38,37	0,33	13,43	0,23	16,29	0,27	53,25
Юнтоловский	0,16	10,76	0,34	5,25	0,18	6,19	0,29	15,31
Южное побережье Невской губы	0,16	7,46	0,32	6,09	0,22	5,69	0,14	18,05

На рис. 5 четко прослеживается, что с началом вегетационного периода (апрель–август) увеличивается значение NDVI, которое далее снижается. Высокие значения в феврале в Юнтоловском и Новоорловском заказнике и парке Сосновка объясняются наличием хвойных пород деревьев.

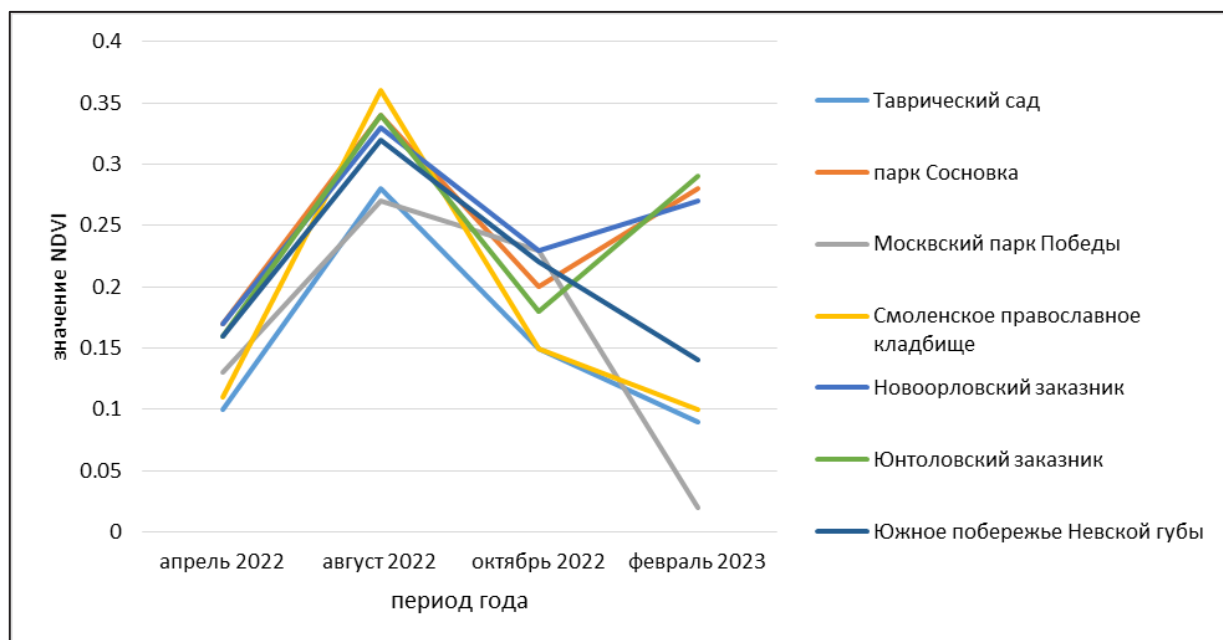


Рис. 5. Динамика значений NDVI на выбранных объектах по сезонам  
 Fig. 5. Dynamics of NDVI values at selected objects by seasons

На рис. 6 наблюдается динамика светового загрязнения по временам года. С началом вегетационного периода снижается значение яркости, которое резко возрастает к февралю. Зимой в городе имеется снежный покров, который отражает свет от поверхности, увеличивая световое загрязнение. Заказники имеют наименьшие значения яркости, в отличие от парков в центре и на окраине города. Объясняется это тем, что парки освещены существенно, чем охраняемые территории.

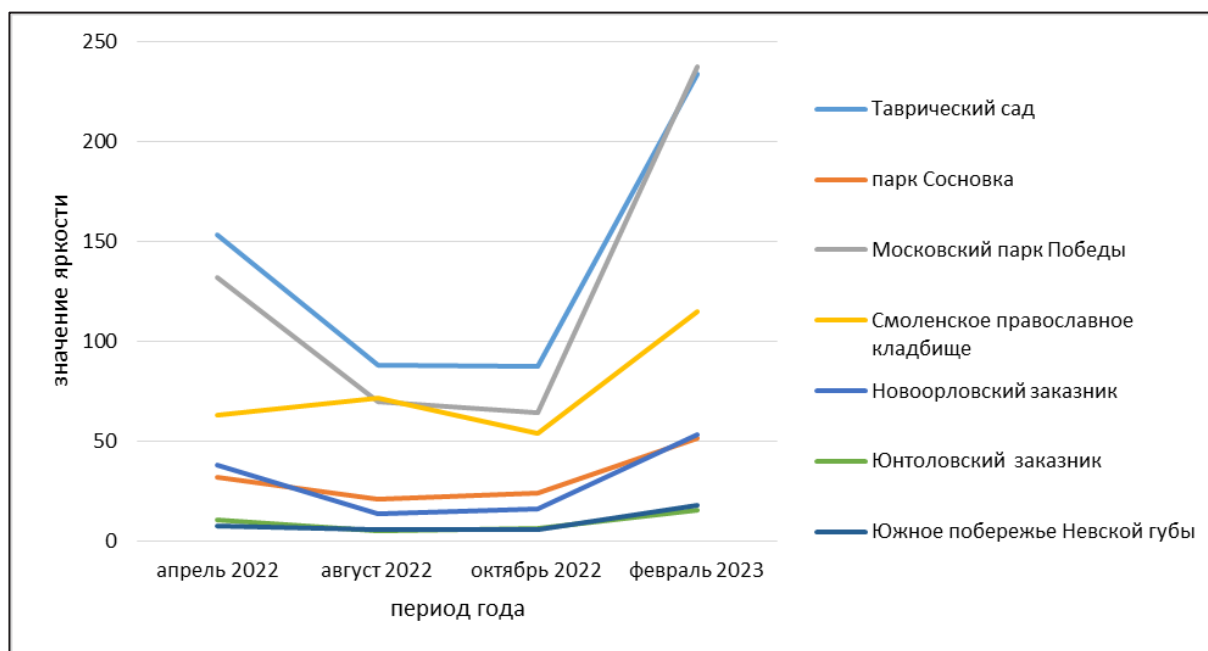


Рис. 6. Динамика показателей яркости на выбранных объектах по сезонам  
Fig. 6. Dynamics of brightness indicators at selected objects by seasons

## ВЫВОДЫ

В результате поиска зависимости вегетации и светового загрязнения была выявлена обратная зависимость этих величин на примере данных дистанционного зондирования. При расчете корреляции Пирсона использовались показатели NDVI и светового загрязнения. По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

- Значения яркости в парках и скверах выше, чем в заказниках.
- Максимальные значения корреляции наблюдаются в вегетационный период. За весь период исследования рекорд был зафиксирован в апреле 2022 г. со значением  $-0,649$ .
- Световое загрязнение находится в прямой зависимости от устойчивого снежного покрова, однако посадка хвойных пород, вегетация которых продолжается в течение всего года, способствует снижению пагубного влияния светового загрязнения в зимнее время.

Данная методика подойдет для проведения исследований в крупных городах и агломерациях с возможностью построения сетки  $300 * 300$  м. Кроме того, применение данных космо- и аэрофотосъемки в ближнем инфракрасном диапазоне для мониторинга состояния растительного покрова способствует поддержанию зеленых зон в виде, благотворно влияющем на здоровье человека и животного мира.

Авторы могут рекомендовать активное внедрение смарт-технологий (АСУНО) освещения в парки и ООПТ. В свою очередь, смарт-технологии составляют концепцию «умного парка» как часть «умного города».

Изучение глобальных изменений климата и окружающей среды и адаптация экосистем к этим изменениям на основе математических моделей соответствует принципам устойчивого развития городов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Воличенко О. В., Цурик Т. О.* «Умный ландшафт» городского парка. *Academia. Архитектура и Строительство*, 2023. № 4. С. 118–126. DOI: 10.22337/2077-9038-2023-4-118-126.

*Голубец Д. И., Ермолаева Я. К., Карнаухов Д. Ю., Зилов Е. А.* Применение дистанционного зондирования Земли в исследовании светового загрязнения водных экосистем на примере поселка Листвянка. Биоразнообразие, состояние и динамика природных и антропогенных экосистем России: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, 2021. С. 120–124.

*Жуковская М. И., Северина И. Ю., Новикова Е. С.* Световое антропогенное загрязнение: действие на насекомых. *Биосфера*, 2022. Т. 14. № 2. С. 126–136.

*Каган М. Б., Тасенко Д. С.* Оценка динамики светового загрязнения городов-курортов Кавказских минеральных вод (2012–2022 гг.) с применением данных дистанционного зондирования. ГИС-технологии в науках о Земле: Материалы Республиканского научно-практического семинара студентов и молодых ученых, 2023. С. 170–177. Электронный ресурс: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/308736> (дата обращения 28.08.2024).

*Кортвов Е. Е.* Загрязнение окружающей среды и его определение с помощью данных дистанционного зондирования. Проблемы природопользования и экологическая ситуация в европейской России и на сопредельных территориях: Материалы VIII Международной научной конференции, 2019. С. 350–357.

*Скрипчинская Е. А., Романенко К. И.* Динамика светового загрязнения Ставропольского края (2012–2020 гг.). УЭПС: Управление, Экономика, Политика, Социология, 2021. № 3. С. 98–105. DOI: 10.24412/2412-2025-2021-3-98-105.

*Шовенгердт Р. А.* Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. С. 560.

*Aubrecht C., Leon J.* Evaluating Multi-Sensor Nighttime Earth Observation Data for Identification of Mixed vs. Residential Use in Urban Areas. *Remote Sensing*, 2016. V. 8. DOI: 10.3390/rs8020114.

*Górniak-Zimroz J., Romańczukiewicz K., Magdalena Sitarska M., Aleksandra Szrek A.* Light-pollution-monitoring method for selected environmental and social elements. *Remote Sensing*, 2024. P. 1–22. DOI: 10.3390/rs16050774.

*Guha S., Govil H.* Land surface temperature and normalized difference vegetation index relationship: a seasonal study on a tropical city. *Springer Nature*, 2020. P. 1–14. DOI: 10.1007/s42452-020-03458-8.

*Hirt M. R., Evans D. M., Miller C. R., Ryser R.* Light pollution in complex ecological systems. *The Royal Society Publishing*, 2023. V. 378. Iss. 1892. DOI: 10.1098/rstb.2022.0351.

*Malik M. S., Shukla J. P., Mishra S. N.* Relationship of LST, NDBI and NDVI using Landsat-8 data in Kandaihimmat watershed, Hoshangabad, India. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, 2019. V. 48. Iss. 1. P. 25–31.

*McGowan T.* Light pollution. *Encyclopedia of Color Science and Technology*, 2016. P. 837–842. DOI: 10.1007/978-1-4419-8071-7\_133.

*Nurbandi W., Yusuf F. R., Prasetya R., Afrizal M. D.* Using Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) Imagery to identify and analyze light pollution. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016. V. 47. P. 1–11. DOI: 10.1088/1755-1315/47/1/012040.

*Schroer S., Hölker F.* Light pollution reduction: methods to reduce the environmental impact of artificial light at night. *Handbook of Advanced Lighting Technology*, 2017. P. 991–1010. DOI: 10.1007/978-3-319-00176-0\_43.

## REFERENCES

*Aubrecht C., Leon J.* Evaluating Multi-Sensor Nighttime Earth Observation Data for Identification of Mixed vs. Residential Use in Urban Areas. *Remote Sensing*, 2016. V. 8. DOI: 10.3390/rs8020114.

*Golubets D. I., Ermolaeva Ya. K., Karnaukhov D. Yu., Zilov E. A.* The use of remote sensing of the Earth in the study of light pollution of aquatic ecosystems on the example of the village of Listvyanka. Biodiversity, state and dynamics of natural and anthropogenic ecosystems in Russia: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference, 2021. P. 120–124 (in Russian).

*Górniak-Zimroz J., Romańczukiewicz K., Magdalena Sitarska M, Aleksandra Szrek A.* Light-pollution-monitoring method for selected environmental and social elements. *Remote Sensing*, 2024. P. 1–22. DOI: 10.3390/rs16050774.

*Guha S., Govil H.* Land surface temperature and normalized difference vegetation index relationship: a seasonal study on a tropical city. *Springer Nature*, 2020. P. 1–14. DOI: 10.1007/s42452-020-03458-8.

*Hirt M. R., Evans D. M., Miller C. R., Ryser R.* Light pollution in complex ecological systems. *The Royal Society Publishing*, 2023. V. 378. Iss. 1892. DOI: 10.1098/rstb.2022.0351.

*Kagan M. B., Tasenko D. S.* Assessment of the dynamics of light pollution in the resort towns of the Caucasian mineral waters (2012–2022) using remote sensing data. *GIS technologies in Earth sciences: Proceedings of the Republic Scientific and Practical Seminar of Students and Young Scientists*, 2023. P. 170–177 (in Russian). Web resource: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/308736> (accessed 28.08.2024).

*Kortov E. E.* Environmental pollution and its determination using remote sensing data. *Problems of nature management and the ecological situation in European Russia and adjacent territories: Proceedings of the VIII International Scientific Conference*, 2019. P. 350–357 (in Russian).

*Malik M. S., Shukla J. P., Mishra S. N.* Relationship of LST, NDBI and NDVI using Landsat-8 data in Kandaihimmat watershed, Hoshangabad, India. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, 2019. V. 48. Iss. 1. P. 25–31.

*McGowan T.* Light pollution. *Encyclopedia of Color Science and Technology*, 2016. P. 837–842. DOI: 10.1007/978-1-4419-8071-7\_133.

*Nurbandi W., Yusuf F. R., Prasetya R., Afrizal M. D.* Using Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) Imagery to identify and analyze light pollution. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016. V. 47. P. 1–11. DOI: 10.1088/1755-1315/47/1/012040.

*Schroer S., Hölker F.* Light pollution reduction: methods to reduce the environmental impact of artificial light at night. *Handbook of Advanced Lighting Technology*, 2017. P. 991–1010. DOI: 10.1007/978-3-319-00176-0\_43.

*Shovengerdt R. A.* Remote sensing. Models and methods of image processing. Moscow: Technosphaera, 2010. P. 560 (in Russian).

*Skripchinskaya E. A., Romanenko K. I.* Dynamics of light pollution in the Stavropol Territory (2012–2020). UEPS: Management, Economics, Politics, Sociology, 2021. No. 3. P. 98–105 (in Russian). DOI: 10.24412/2412-2025-2021-3-98-105.

*Volichenko O. V., Tsurik T. O.* “Smart landscape” of City Park. Academia. Architecture and Construction, 2023. No. 4. P. 118–126 (in Russian). DOI: 10.22337/2077-9038-2023-4-118-126.

*Zhukovskaya M. I., Severina I. Yu., Novikova E. S.* Light anthropogenic pollution: effect on insects. Biosfera, 2022. V. 14. No. 2. P. 126–136 (in Russian).

---