

УДК 504.3.054:502.3:574.2(470.26)
DOI 10.17513/use.38280

БИОИНДИКАЦИЯ КАК МЕТОД ОЦЕНКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ (НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА КАЛИНИНГРАДА)

¹Романчук А.Ю., ¹Барина Г.М., ¹Бикташева Э.А., ²Рагулина И.Р.

¹Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград,
e-mail: annaroman@mail.ru, barinova-gm@mail.ru, elina.b2000@gmail.com;

²Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
Калининград, e-mail: izragulina@mail.ru

Проведена оценка качества атмосферного воздуха методами биоиндикации на примере города Калининграда – эксклава на побережье Балтийского моря. В качестве индикаторов выбраны клен остролистный (*Acer platanoides*), клен псевдоплатановый (*Acer pseudoplatanus*), клен серебристый (*Argentum dignissim*). Для проведения исследования территория города была разделена на 34 квадрата, в узлах которых определялась площадь проективного покрытия кленов лишайником Пармелия бороздчатая (*Parmelia sulcata* Taylor). Кроме того, оценивалось состояние растительности – степени изреженности кроны, наличие хлорозов, некрозов на коре и листьях деревьев. Оценка антропогенной нагрузки проводилась с учетом природных особенностей и градостроительной структуры территории в период летнего сезона 2021 г. По результатам лихеноиндикационного картирования установлено, что в 44,5% объектов исследования площадь проективного покрытия составила 50% и более, свидетельствуя о достаточно высоком качестве воздушной среды. На 38,2% участков города отсутствие лишайников позволяет оценить состояние атмосферного воздуха как неблагоприятное. Полученные результаты рассматриваются в контексте уровня антропогенной нагрузки в различных районах города (планировка, построение уличных сетей, степень загазованности воздуха), особенностей атмосферных процессов, способствующих очищению воздуха. В условиях современного потепления и экстремальности климата подчеркивается важность использования зеленых насаждений в городской инфраструктуре для формирования комфортной среды.

Ключевые слова: городская инфраструктура, Калининград, лихеноиндикация, загрязнение атмосферного воздуха

BIOINDICATION AS A METHOD FOR ASSESSING ATMOSPHERIC AIR POLLUTION IN URBANIZED TERRITORIES (BASED ON THE EXAMPLE OF THE CITY OF KALININGRAD)

¹Romanchuk A.Yu., ¹Barinova G.M., ¹Biktasheva E.A., ²Ragulina I.R.

¹Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad,

e-mail: annaroman@mail.ru, barinova-gm@mail.ru, elina.b2000@gmail.com;

²Baltic Fishing Fleet State Academy FSBEI HE «Kaliningrad State Technical University»,
Kaliningrad, e-mail: izragulina@mail.ru

The assessment of atmospheric air quality by bioindication methods was carried out using the example of the city of Kaliningrad, an exclave on the Baltic Sea coast. Holly maple (*Acer platanoides*), pseudoplatane maple (*Acer pseudoplatanus*), silver maple (*Argentum dignissim*) were selected as indicators. To conduct the study, the city territory was divided into 34 squares, at the nodes of which the area of the projective covering of maples with lichen *Parmelia sulcata* Taylor was determined. In addition, the state of vegetation was assessed – the degree of sparseness of the crown, the presence of chlorosis, necrosis on the bark and leaves of trees. The assessment of anthropogenic load was carried out taking into account the natural features and urban planning structure of the territory during the summer season of 2021. According to the results of lichenindication mapping, it was found in 44.5% of the objects under study, the area of the projective coverage was 50% or more, indicating a sufficiently high quality of the air environment. In 38.2% of the city's sites, the absence of lichens makes it possible to assess the state of the atmospheric air as unfavorable. The results obtained are considered in the context of the level of anthropogenic load in various areas of the city (layout, construction of street networks, degree of air pollution), features of atmospheric processes contributing to air purification. In the context of modern warming and extreme climate, the importance of using green spaces in urban infrastructure to create a comfortable environment is emphasized.

Keywords: urban infrastructure, Kaliningrad, lichen indication, air pollution

Интенсивное развитие промышленности и урбанизация в целом привели к значительному увеличению выбросов в атмосферный воздух вредных веществ. В результате созданная человеком городская инфраструктура затрудняет самоочищение природной сре-

ды, что представляет серьезную угрозу для здоровья человека. В связи с этим оценка состояния атмосферного воздуха урбанизованных территорий для предотвращения и предупреждения негативных последствий – актуальная и необходимая задача [1, 2, 3].

Город Калининград – административный центр Калининградской области, его площадь составляет 223,03 км², население на 01.01.2023 года – 489735 человек. В его состав входят три административных района – Ленинградский, расположенный в восточной части города, с населением 181548 человек, Московский – в южной части города с населением 182554 человек, и Центральный, в котором проживают 125633 человек [4].

Природный каркас города представлен озелененными пространствами, 13 парками, 43 скверами, водно-озелененными территориями (466 га) и пригородными лесами (1568 га), в их числе: Прибрежный на юго-западной окраине, Космодемьянский – на западе и Чкаловский – на севере. К преобладающим породам деревьев и кустарников в системе озеленения города относятся клен остролистный (*Acer platanoides*), липа крупнолистная (*Tilia platyphyllos*), граб обыкновенный (*Carpinus betulus*), береза повислая (*Betula pendula*), рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia*), сирень обыкновенная (*Syringa vulgaris*), боярышник обыкновенный (*Crataegus laevigata*), снежная-годник белый (*Symphoricarpos albus*), Форзиция яйцевидная (*Forsythia ovate*), в том числе интродуценты – магнолия Суланжа (*Magnolia soulangeana*), бархат амурский (*Phellodendron amurense*) и др.

В течение большей части года территория находится под влиянием устойчивого переноса воздушных масс с Атлантического океана с преобладанием юго-западных и западных ветров. Антропогенное воздействие на экосистемы и загрязнение атмосферного воздуха связаны с выбросами автотранспорта и промышленных предприятий, расположенных как в черте города, так и на его окраинах. Значительную роль играет также трансграничный перенос загрязняющих веществ из сопредельных стран Европы – Польши, Германии, Дании, Норвегии [5].

Цель работы заключалась в оценке загрязнения атмосферного воздуха и экологического зонирования г. Калининграда на основе методов биоиндикации.

Материалы и методы исследования

Для оценки степени атмосферного загрязнения используются различные методы биоиндикации, в том числе лишеноиндикация. Лишайники рассматриваются как специфический индикатор, демонстрирующий связь загрязнения атмосферного воздуха в условиях урбаноэкосистем с учетом

их видового состава, степени проективного покрытия, морфологии, содержания химических веществ [6, 7, 8]. Оценка антропогенной нагрузки проводилась в период летнего сезона 2021 г.

В качестве организма-биоиндикатора был выбран лишайник Пармелия бороздчатая (*Parmelia sulcata Taylor*). Этот вид предпочитает богатый на питательные вещества субстрат с хорошим освещением, произрастает как на лиственных, так и на хвойных деревьях. Исчезает в случае сильного загрязнения атмосферного воздуха. Он относится к среднеустойчивому классу, способен аккумулировать в себе различные химические элементы, в том числе тяжелые металлы [9]. В качестве учетных деревьев выбраны следующие породы: клен остролистный (*Acer platanoides*), клен псевдоплатановый (*Acer pseudoplatanus*), клен серебристый (*Argentum dignissim*). В культуре озеленения г. Калининграда эти виды древесных насаждений преобладают, в первую очередь, в парках и скверах.

Для проведения исследования территория города была разделена на 34 квадрата размерами 2x2 км [10]. Реперные участки выбирали в узлах квадратов, в которых определялась площадь проективного покрытия лишайниками кленов с помощью метода, разработанного М.В. Кравченко и А.С. Боголюбовым в 1996 году. На исследуемых участках оценивали состояние растительности – наличие хлорозов, некрозов на коре и листьях деревьев, видимых повреждений и паразитов, степень изреженности кроны, нарушения корневой системы. Для визуального представления и пространственного анализа полученных данных использовали программу QGIS.

Результаты исследования и их обсуждение

В распространении и накоплении загрязняющих веществ значительную роль играют особенности планировки города [11]. В Калининграде можно выделить два преобладающих вида построения уличных сетей: радиально-кольцевую и комбинированную. Основные транспортные магистрали в городе расположены согласно радиально-кольцевому типу, отходя от центра города в восемь разных направлений, часть улиц соответствует комбинированному типу построения уличных сетей. С одной стороны, расположение городских магистралей способствует накоплению загрязняющих веществ в центре города, с другой – преоб-

ладание западного, юго-западного переноса воздушных масс по направлению основных дорог создает так называемый эффект ветрового каньона, что способствует выносу поллютантов за пределы города.

Важно отметить зависимость особенностей ветрового и температурного режима от типа городской застройки. Современный Калининград можно отнести к типу «город-чаша», для которого характерны малоэтажность в центральной части города (с расположенными там охраняемыми ландшафтными, историческими архитектурными объектами) и увеличение высотности зданий при движении от центра к окраинам. Для застройки типа «город-чаша» также характерно образование острова тепла в плотно застроенной центральной части города, где преобладает покрытие естественной поверхности искусственными материалами (асфальтом, плиткой и др.). Эффект городского острова тепла усиливается при воздействии солнечной радиации на южные стены зданий. Вероятность формирования острова тепла также увеличивают многоэтажные здания, способствуя блокировке ветровых потоков, поглощению солнечного излучения и снижению интенсивности конвективного охлаждения [12, 13].

Мониторинг состояния атмосферного воздуха в Калининграде проводится на пяти стационарных постах, расположенных в разных районах города [4]. В последние годы

уровень загрязнения атмосферного воздуха оценивается как высокий [14]. Наибольшая динамика в 2013–2017 гг. и 2018–2022 гг. характерна для диоксида азота, оксида углерода, взвешенных веществ и бензапирена, содержание которых за последние пять лет уменьшилось, но остается достаточно высоким: в пределах 1,2–1,4 ПДК, бензапирена – 4,8 ПДК. Доля проб атмосферного воздуха с превышением формальдегида, наоборот, увеличилась в два раза, возрастая преимущественно в летний период до 2,0, в особо опасные периоды – до 3,0–3,3 ПДК (таблица).

Наиболее высокие концентрации загрязняющих веществ наблюдаются в зимний период (при отрицательных температурах) и высокой влажности воздуха. В летний период наличие осадков выступает как положительный фактор, способствующий оседанию загрязняющих частиц и их вымыванию из атмосферы.

Метеорологический потенциал атмосферы (МПА), рассчитанный по методике Т.С. Селегея [15] для условий Калининграда в 2021 г., показал, что его значения варьировали от 1,0 (в январе) до 1,8 (в июне). Средний годовой коэффициент МПА – 0,8, что соответствует достаточно высокому потенциалу очищения атмосферы. Наиболее благоприятные условия для рассеивания примесей наблюдались в весенние месяцы (рис. 1).

Доля проб атмосферного воздуха с превышением максимально разовых предельно допустимых концентраций содержания загрязняющих веществ в Калининграде (в ПДК) в периоды 2013–2017 гг., 2018–2022 гг.

| Годы | Взвешенные вещества | Диоксид серы | Оксид углерода | Диоксид азота | Формальдегид | Аммиак | Бензапирен |
|---------------|---------------------|--------------|----------------|---------------|--------------|--------|------------|
| 2013–2017 гг. | | | | | | | |
| 2013 | 2,6 | 0,3 | 2,4 | 2,2 | 0,8 | 2,9 | 4,4 |
| 2014 | 2,0 | 0,1 | 1,6 | 2,9 | 0,5 | 0,5 | 5,1 |
| 2015 | 3,4 | 0,1 | 1,8 | 2,7 | 0,8 | 0,6 | 4,8 |
| 2016 | 1,2 | 0,1 | 0,8 | 1,7 | 1,0 | 0,8 | 5,1 |
| 2017 | 1,6 | 0,1 | 1,5 | 0,8 | 0,3 | 1,1 | 6,1 |
| среднее | 2,2 | 0,1 | 1,6 | 2,1 | 0,7 | 1,2 | 5,1 |
| 2018–2022 гг. | | | | | | | |
| 2018 | 1,4 | 0,1 | 1,1 | 1,7 | 0,9 | 1,4 | 3,9 |
| 2019 | 1,6 | 0,03 | 1,0 | 1,1 | 0,6 | 1,6 | 5,5 |
| 2020 | 1,2 | 0,04 | 1,0 | 1,9 | 2,0 | 1,7 | 9,0 |
| 2021 | 1,0 | 0,1 | 0,8 | 1,0 | 1,6 | 2,4 | 2,3 |
| 2022 | 1,6 | 0,3 | 1,9 | 1,5 | 1,7 | 1,2 | 3,2 |
| среднее | 1,4 | 0,1 | 1,2 | 1,4 | 1,4 | 1,7 | 4,8 |

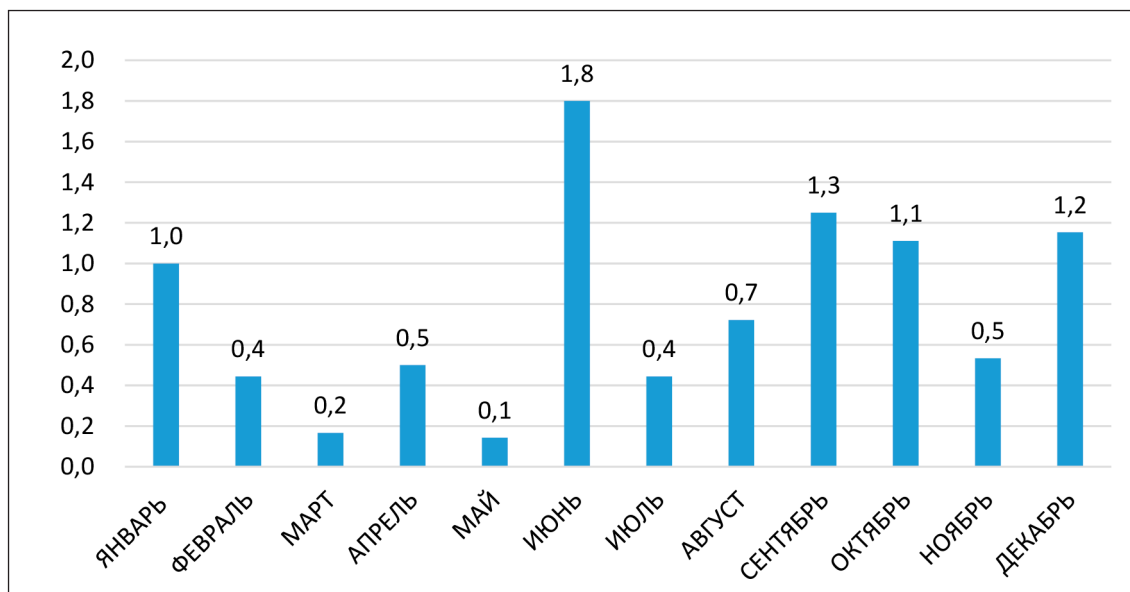


Рис. 1. Значения метеорологического потенциала в Калининграде в 2021 г.

В целом количество выбросов в атмосферный воздух в 2021 г. составило 6,538 тыс. т, из них 80% – газообразных и 20% – твердых веществ. По комплексному показателю – индексу загрязнения атмосферы (ИЗА) – город Калининград относится к городам с высоким уровнем загрязнения атмосферного воздуха. За последние годы ИЗА варьировал в пределах 10–13 единиц [4].

Наибольший вклад в загрязнение атмосферного воздуха в г. Калининграде вносит автотранспорт, удельный вес которого составляет 83%, что в пять раз больше выбросов от стационарных источников – котельных, работающих на угле, дизельном топливе и мазуте, домов с печным отоплением, которые до сих пор есть на территории города. На 01.01.2023 г. в г. Калининграде действуют 22 угольные котельные и столько же газовых. В пределах города насчитывается 51 предприятие, в том числе судостроения и судоремонта, машиностроения, металлообработки (36,3%), производства строительных материалов, пищевой промышленности (18,1%), предприятия по обработке дерева (15,1%), химической, нефтехимической и легкой промышленности (6%) [4].

Оценка загрязнения атмосферного воздуха Калининграда методами картирования результатов лишеноиндикации позволила выделить в районах города участки с наиболее неблагоприятной ситуацией. Результаты исследования показали, что площадь проективного покрытия лишайником Пармелия бороздчатая клена остро-

листного в восьми точках (23,5%) превысила 5%, в семи точках (21%) – выше 50%, что характеризует экологическое состояние воздушного бассейна как благоприятное. На остальных участках (32%) зафиксировано отсутствие лишайников, что отражает высокий уровень загрязнения атмосферы. В восьми точках (23,5%), главным образом, расположенных в южной части города, не удалось определить площадь проективного покрытия в связи с отсутствием клена остролистного в культуре озеленения. Для наглядного представления и пространственного анализа полученных данных с помощью программы QGIS построена карта-схема оценки площади проективного покрытия лишайниками.

Для территории города в целом характерна мозаичная картина проективного покрытия деревьев лишайниками, что отражает неоднородность загрязнения атмосферного воздуха в пределах городской черты. Ареалы с наиболее благоприятным состоянием воздушной среды, где лишайники распространены в большей степени, приурочены к озелененным пространствам города – паркам, скверам, кварталам с низкоэтажной застройкой в Ленинградском и Центральном районах. Максимальное проективное покрытие деревьев лишайником отмечено на окраинах города, вблизи пригородных лесных массивов, в том числе, на северной окраине города, где большую роль в очистке атмосферы играет Чкаловский пригородный лесной массив.

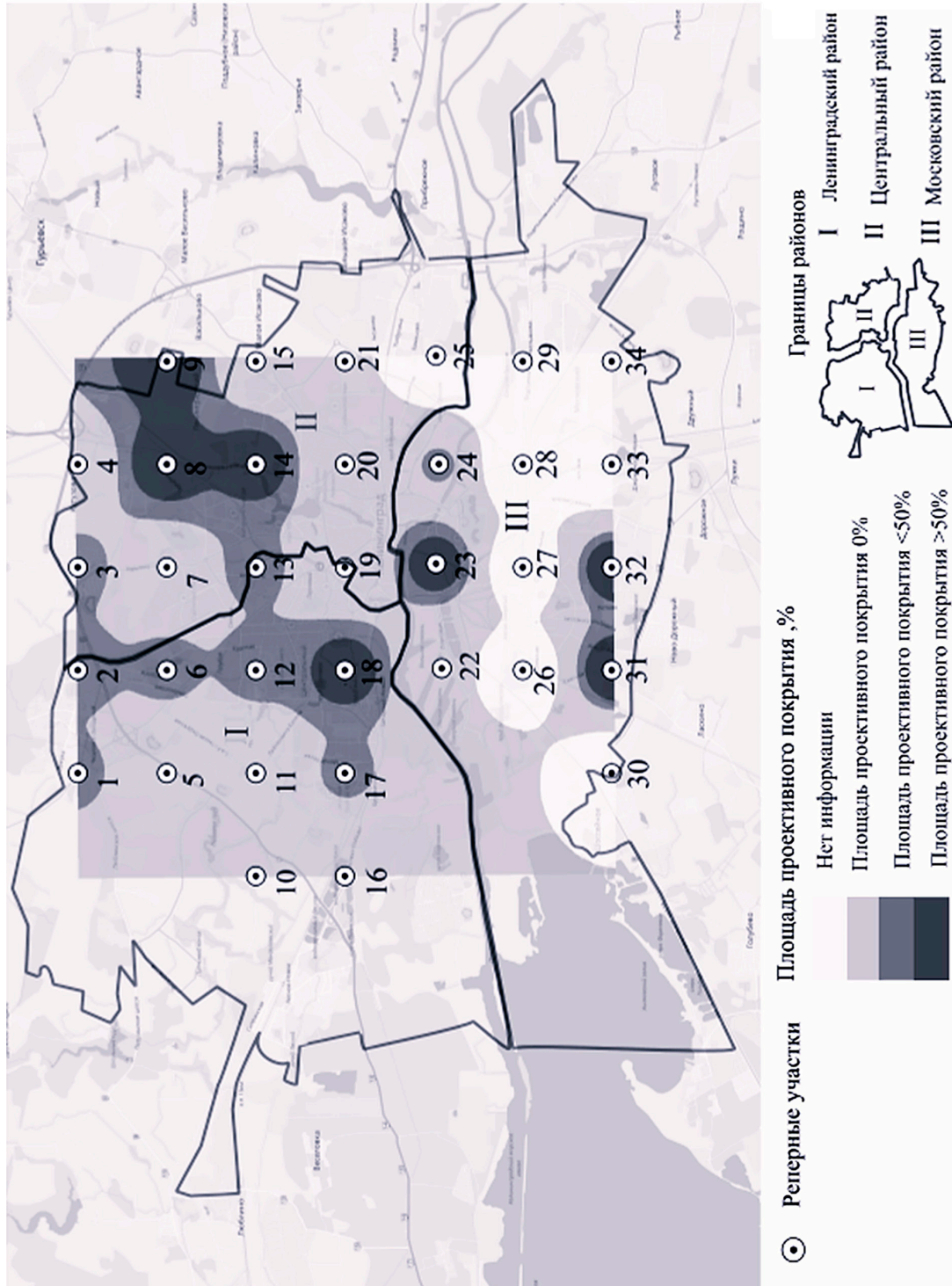


Рис. 2. Карта-схема результатов лишениоиндикации на территории г. Калининграда

Ареалы с отсутствием лишайников (в Центральном и Ленинградском районах) расположены вдоль основных транспортных магистралей в восточном направлении (выезд за город) и западном (выезд к морю), а также вблизи промышленных объектов (рис. 2). Можно полагать, что в местах плотного транспортного потока в городской среде происходит накопление углекислоты и других загрязняющих веществ, которые усваиваются растениями и приводят к быстрой деградации, существенно изменяя их вегетативную способность. Результаты дендроиндикации выявили, что в ареалах с отсутствием лишайников на древостое клена остролистного отмечаются хлороз листьев, местами некротические повреждения, опущение ветвей, полное отсутствие листьев и коры.

В южной части города (Московский район) практически оказалось невозможно провести анализ из-за отсутствия посадок клена остролистного в системе озеленения. При визуальной оценке состояния имеющегося древостоя (липа крупнолистная, береза повислая и др.) были отмечены наличие многочисленных хлорозов и некрозов листьев, высокая степень изреженности кроны, поврежденная корневая система.

Выводы

Таким образом, проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

- уровень загрязнения атмосферного воздуха в Калининграде оценивается как высокий (ИЗА – 10–12), что подтверждается отсутствием лишайника Пармелия бороздчатая на 38% объектов исследования. Наибольшие концентрации загрязняющих веществ наблюдаются при неблагоприятных условиях для рассеивания примесей в осенне-зимний период, а также в периоды экстремального повышения температуры воздуха;

- предлагаемый подход может применяться для оценки загрязнения атмосферы при экспертизе проектов застройки города с учетом тщательного подхода к выбору объектов лишеноиндикации, в первую очередь, их распространенности в озеленении города;

- оценка загрязнения атмосферного воздуха методами лишено- и биоиндикации подтверждает выводы ряда авторов о роли антропогенного фактора в изменении качества воздушной среды, однако необходимо уделять особое внимание анализу направления господствующих ветровых потоков в соответствии с планировкой и застройкой

города, увеличению зеленых пространств для минимизации эффекта острова тепла;

- необходимо проведение мероприятий, направленных на снижение уровня загрязнения атмосферного воздуха в соответствии с установленными ПДК, что касается, в первую очередь, модернизации транспортной инфраструктуры города, разработки комплексной схемы организации дорожного движения;

- в системе озеленения города важно учитывать значение зеленых массивов, обеспечивающих комфортные температурно-радиационные условия для жителей, снижение отрицательной роли городского транспорта и промышленных предприятий (Ленинградский и Московский районы). Особое внимание необходимо обратить на сохранение старовозрастных древесных растений, которые не только создают уникальный колорит исторического облика города, но и обладают высокой способностью улавливать углекислый газ и очищать атмосферный воздух. В условиях современного потепления климата необходимо широкое внедрение интродуцентов, произрастающих в более южных регионах.

Список литературы

1. Кузнецов Е.В., Шакиров Р.Р. Биоиндикация загрязнения атмосферного воздуха с помощью лишайников // The scientific heritage. 2021. № 68. С. 41-44.
2. Mikhaylov A. Lichens as indicators of atmospheric pollution in urban ecosystems // Israel Journal of Ecology and Evolution. 2020. Vol. 67, Is.1-2. P. 60-68. DOI:10.1163/22244662-bja10016.
3. Федорова Д.Г., Укенов Б.С. Флуктуирующая асимметрия листьев рябины обыкновенной (*Sorbus aucuparia* L.) как биоиндикатор аэротехногенного загрязнения города Оренбурга // Вестник БФУ им. И. Канта. Серия: естественные и медицинские науки. 2023. № 4. С.103-114. DOI: 10.5922/gikbfu-2023-4-8.
4. Государственный доклад «Об экологической обстановке в 2021, 2022 гг.» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ecat.k.ru/gosudarstvennoe-zadanie/doklad-ob-ekologicheskoy-obstanovke-v-kaliningrade> (дата обращения: 23.04.2024).
5. Топчая В.Ю., Котова Е.И., Чечко В.А. Вклад трансграничного атмосферного переноса тяжелых металлов в загрязнение окружающей среды калининградской области // Успехи современного естествознания. 2021. № 9. С. 65-69. DOI 10.17513/use.37687.
6. Пунгин А.В. Геоэкологическая оценка состояния атмосферного воздуха города Калининграда методом лишеноиндикации: автореф. дис....канд. геогр. наук. Калининград, 2018. 23 с.
7. Домнина Е.А., Огородникова С.Ю., Пестов С.В., Ашихмина Т.Я. Методы лишеноиндикации в оценке загрязнения атмосферного воздуха соединениями фосфора // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 4. С. 37-44. DOI: 10.25750/1995-4301-2019-4-037-044.
8. Панченко Л.С. Лишеноиндикация загрязнения атмосферного воздуха в природном парке «Волго-Ахтубинская пойма» // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное об-

разование. 2022. № 2 (66). С. 168-176. DOI: 10.32786/2071-9485-2022-02-21.

9. Пунгин А.В., Чайка К.В., Федурев П.В., Николаева Н.В., Коломиец А.С. Оценка влияния городской среды на видовое разнообразие и физиолого-биохимические особенности лишайников // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 3. С. 72-77. DOI: 10.25750/1995-4301-2020-3-072-077.

10. Asta J., Erhardt W., Ferretti M., Fornasier F., Kirschaum U., Nimis P.L., Purvis O.W., Pirintsos S., Scheidegger C., Van Haluwyn C., Wirth V. Mapping lichen diversity as an indicator of environmental quality // Monitoring with lichens-monitoring lichens. 2002. P. 273-279. DOI: 10.1007/978-94-010-0423-7_19.

11. Храпкина Е.П. Экология городов с различными схемами улично-дорожной сети // Alfabuild. 2017. № 1. С. 135-140.

12. Шукуров И.С., Оленьков В.Д., Пайкан В., Аманов Р.М. Обеспечение экологической безопасности городов

с учетом аэрационного режима воздуха // Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова. 2017. № 5. С. 41-44. DOI: 10.12737/article_590878faafb818.60730967.

13. Барина Г.М., Гаева Д.В., Краснов Е.В., Романчук А.Ю., Ушакова Л.О. Роль климатических факторов в распространении природно-очаговых клещевых инфекций в условиях изменения климата на северо-западе России // Вестник Воронежского университета. Серия: География. Геоэкология. 2023. № 1. С. 23-34. DOI: 10.17308/geo/1609-0683/2023/1/23-34.

14. Pungin A., Dedkov V. Assessment of air quality by lichen indication method in the central part of Kaliningrad // Research Journal of Chemistry and Environment. 2017. Vol. 21, Is. 2. P. 32-39.

15. Селегей Т.С., Юрченко И.П. Потенциал рассеивающей способности атмосферы // География и природные ресурсы. 1990. № 2. С. 132-137.