

Геоэкологические исследования

УДК 504.3054(470.51-21):528.9(045)

А.В. Семакина

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ

Проведена количественная оценка уровня загрязнения атмосферного воздуха г. Ижевска посредством натурных исследований (по программе разового и эпизодического обследования) и с применением методов математического моделирования. Выделены зоны с разными уровнями загрязнения, различной степенью влияния факторов загрязнения. Верификация значений КИЗА, полученных расчётным путем и входе натурных исследований, показала сходимость результата на 72 %. Расхождения в полученных значениях, вероятнее всего, связаны с неполным учетом стационарных источников выбросов (представленных в реестре НВОС), неизбежными погрешностями, связанными с аппроксимацией условий выбросов и рассеяния, заложенными в методике расчета.

Ключевые слова: атмосферный воздух, городская среда, натурные исследования, математическое моделирование, Ижевск.

DOI: 10.35634/2412-9518-2024-34-1-41-53

Согласно п. 3 ФЗ РФ № 7 «Об охране окружающей среды», к основным принципам охраны окружающей среды относится в том числе обязательство государства на информационное обеспечение населения данными о состоянии атмосферного воздуха: «...соблюдение права каждого на получение достоверной информации о состоянии окружающей среды...»¹. В целях реализации данного принципа на природоохранные государственные органы возложено обязательство осуществлять мониторинг, прогноз и оценку состояния атмосферного воздуха и обеспечивать органы власти, организации и население «текущей и экстренной информацией о загрязнении атмосферного воздуха» (гл. 23 ФЗ РФ № 96 «Об охране атмосферного воздуха»)². На государственном уровне в настоящее время в РФ используются следующие подходы к мониторингу состояния атмосферы: мониторинг выбросов от промышленных источников (традиционно, информация накапливалась камеральным путем, однако сейчас вводится система автоматического мониторинга выбросов [1]); мониторинг состояния воздуха (концентраций ЗВ); мониторинг метеорологических условий, неблагоприятных для рассеяния выбросов. С точки зрения информативности для конечного пользователя (населения), наиболее значимыми будут данные, полученные в ходе мониторинга состояния атмосферы (концентраций ЗВ).

Согласно Приказу Минприроды России от 30.07.2020 № 524³, на 2020 г. в 1115 российских городах должно функционировать не менее 1843 пунктов наблюдения за качеством атмосферного воздуха. Согласно отчету Росгидромета, за 2021 год их количество составляет всего 692 шт., или 37,5 % от минимальной нормативной потребности. В 2022 году отметилась тенденция лишь к сокращению количества постов: наблюдения за загрязнением атмосферного воздуха проводятся в 249 городах, на 688 пунктах (из них регулярные наблюдения выполнялись в 233 городах на 624 пунктах) [2]. Количество постов мониторинга, которые должны быть размещены в пределах города, зависит от численности населения и изменяется от 1–5 (при численности населения в городе 50–500 тысяч человек) до 10–16 (для населенных пунктов с численностью населения более 1 миллиона человек). На территории

¹ Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ (ред. от 04.08.2023) «Об охране окружающей среды» (Электронная версия) URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823/bb9e97fad9d14ac66df4b6e67c453d1be3b77b4c/ (дата обращения: 19.08.2023)

² Федеральный закон от 04.05.1999 № 96-ФЗ (ред. от 13.06.2023) «Об охране атмосферного воздуха» (Электронная версия) URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_22971/bb9e97fad9d14ac66df4b6e67c453d1be3b77b4c/ (дата обращения: 19.08.2023)

³ Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 30 июля 2020 года № 524 «Об утверждении требований к проведению наблюдений за состоянием окружающей среды, ее загрязнением». URL: <https://docs.cntd.ru/document/565649091> (дата обращения: 25.08.2023).

города Ижевска комплексная лаборатория мониторинга окружающей среды Удмуртского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды проводит регулярные наблюдения за уровнем загрязнения атмосферного воздуха на 4 стационарных и 3 маршрутных постах (рис. 1а) [3], что соответствует требуемым нормативам, но является недостаточным для пространственной интерпретации данных о состоянии атмосферного воздуха. Основными барьерами в расширении территориальных систем наблюдений являются дефицит финансирования, высокая себестоимость традиционных методов мониторинга, сложность и дороговизна внедрения автоматических систем контроля. Кроме этого, существующие системы мониторинга, к сожалению, не всегда учитывают динамику городских условий, таких как изменение интенсивности транспортных потоков, объемов и состава промышленных выбросов, появление новых производств, изменение взаимного расположения источников загрязнения, возникновение/исчезновение площадных источников загрязнения (например, строительные площадки), сезонную динамику ветрового режима. В тоже время, несомненным достоинством данного рода источника информации является широкий территориальный охват, единые методологические подходы и стандарты, широкая номенклатура загрязняющих веществ, которые могут контролироваться в рамках мониторинга [4].

На данный момент, дефицит объективной количественной информации о состоянии атмосферного воздуха (данных о концентрациях ЗВ) в РФ с одной стороны, и формирование общественного понимания степени влияния факторов окружающей среды (в т. ч. состояния атмосферного воздуха) на здоровье населения [5; 6] с другой стороны, приводит к появлению общественных и коммерческих сервисов и ресурсов предоставления информации о состоянии атмосферного воздуха. Примером таких сервисов могут служить сервисы BreezoMeter [7], «ЭКОВИЗОР» [8], R-NOX [9]. Недостатками такого рода информационных ресурсов являются сложность оценки метрологической и методологической репрезентативности данных, применение примитивных подходов к пространственной интерпретации данных, низкая чувствительность используемых датчиков. Дефицит данных о состоянии окружающей среды, нерепрезентативность используемых исходных данных о состоянии атмосферы, полученных в ходе общественного мониторинга, или некорректность их интерпретации в некоторых случаях используется как инструмент политического или социального манипулирования [10; 11]. Необходимо отметить, что дефицит данных существенно сужает и возможности оперативной оценки ситуации для принятия мер быстрого административного реагирования и ограничивает эффективность реализуемых природоохранных мероприятий.

Таким образом, на фоне сформированного на территории РФ дефицита достоверных количественных данных о состоянии атмосферного воздуха, полученных на основании государственной мониторинговой сети, можно прогнозировать следующие сценарии дальнейшего развития ситуации:

1. *Неблагоприятный сценарий.* На фоне финансовых ограничений, государственные органы в области охраны окружающей среды не смогут расширить и автоматизировать сеть мониторинга состояния атмосферного воздуха и негативного воздействия на него. Отношение к проблеме дефицита информационного обеспечения населения данными о качестве воздуха будет дифференцироваться в зависимости от места проживания. Основное внимание будет уделяться наиболее загрязненным городам. Усиление протестных настроений со стороны населения будет сопровождаться ростом количества «народных сетей» мониторинга с непроверенными и низкокачественными данными. Существенно возрастет риск «околоэкологического» манипулирования общественным настроением в рамках осуществления хозяйственной деятельности.

2. *Положительный сценарий.* Уровень финансирования на реализацию задач мониторинга качества атмосферы вырастет, спектр используемых автоматизированных решений расширится с соответствующей доработкой нормативной базы. Радикально увеличится количество постов государственной сети мониторинга. Количество данных и их оперативность расширятся до объемов, позволяющих предоставлять в режиме реального времени пространственную картину состояния атмосферного воздуха не только в крупных городах, но и на остальной территории. Будут созданы предпосылки для оперативного реагирования на экстремные и системной работы по улучшению качества окружающей среды. При всей позитивности данного сценария, в текущей экономической ситуации автор склонен считать его утопичным.

3. *Стабильный сценарий.* На фоне текущего уровня финансирования, государственные органы в области охраны окружающей среды не смогут расширить и автоматизировать сеть мониторинга состояния атмосферного воздуха и негативного воздействия на него в полном объеме. Дефицит дан-

ных, полученных при помощи натурных исследований, будет компенсироваться использованием методов математического моделирования с применением ресурсов машинного зрения, искусственного интеллекта. Сочетание расчетных методов (более дешевых) с данными, полученными на постах государственной мониторинговой сети, позволит получить достоверную пространственную информацию о состоянии атмосферного воздуха в режиме онлайн. Пространственная интерпретация данных с применением ресурсов геоинформационных систем (ГИС) и с учетом информации о физико-химических свойствах атмосферного воздуха, значимых источниках выбросов, особенностей поведения в атмосфере поллютантов, позволит представлять населению и природопользователям пространственную информацию о загрязнении атмосферы в наиболее удобном для использования виде (онлайн-карты). Система поддержки решений будет объединять кадастры выбросов, мониторинг качества воздуха, моделирование, картирование и оценку качества воздуха для различных стратегий управления. Примерами систем поддержки за рубежом, используемых в крупных городах Европы (например, Стокгольм, Осло, Париж, Вена, Берлин, Лиссабон, Афины), являются Swedish AirViro [12], AirWare [13], AirQUIS [14], EnviMan [15].

Целью данного исследования является определение возможности внедрения методов математического моделирования в среднегодовой оценке состояния атмосферного воздуха городской среды (на примере г. Ижевска). Картографическая визуализация полученных результатов предоставит возможность пространственной верификации полученных данных в сравнении с натурными данными.

Материалы и методы исследований

Натурные исследования состояния атмосферного воздуха. Существующая государственная сеть мониторинга является недостаточной для комплексной пространственной характеристики загрязнения атмосферного воздуха территории города Ижевска, в связи со значительной площадью (с учетом приблизительной площади города 315 км², в общем случае, на каждый пост мониторинга приходится 45 км²), неравномерностью расселения, размещения объектов промышленности и инфраструктуры (неравномерность распространения источников загрязнения является фактором, формирующим разнородную в пространственном отношении картину загрязнения). В случаях дефицита информации о причинах формирования высоких уровней концентрации примеси, установления их неблагоприятного влияния на здоровье населения и окружающую среду, и разработки мероприятий по охране атмосферы, допускается исследование состояния атмосферного воздуха по программе эпизодического обследования, которое проводится для ориентировочной оценки состояния загрязнения воздуха в населенном пункте. Эпизодические обследования должны проводиться в течение 3–5 лет, один раз в 2–3 месяца в течение 10–15 дней (с учетом необходимости получения за год не менее 200 наблюдений за концентрацией каждой примеси независимо от количества точек наблюдений). Наблюдения могут проводиться по одной из программ, рекомендованных для регулярных наблюдений (полной, неполной, сокращенной, суточной), в те же сроки или чаще⁴.

Сотрудниками кафедры экологии и природопользования ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет» под руководством автора в период с 2014 по 2022 гг. проводились исследования состояния атмосферного воздуха г. Ижевска по программе эпизодического обследования на 12 точках, расположенных как внутри жилых кварталов, так и вблизи проезжей части автодорог (рис. 1а). Для получения данных для пространственного анализа уровня загрязнения атмосферного воздуха, в теплый период 2016, 2018 и 2022 гг. на территории г. Ижевска были проведены разовые исследования состояния атмосферного воздуха на 95 точках (рис. 1б). В общей сложности, разовый отбор проб осуществлялся в течение 3 дней в год, в середине недели, в период с 9.00 до 16.00 часов, в период отбора проб не отмечалось неблагоприятных метеоусловий.

Привязка разовых значений концентраций к среднегодовым значениям, полученным по данным эпизодических исследований, производилась через коэффициент, рассчитываемый как отношение среднего значения концентрации примеси в точках эпизодического контроля состояния атмосферного воздуха за период с 2014 по 2022 г. к среднему значению в точках эпизодического контроля, полученному в период разовых исследований (1):

$$K = C_{\text{эп.}(N \text{ период})} / C_{\text{эп.разовые}} \quad (1)$$

⁴ РД 52.04.186-89 Руководство по контролю загрязнения атмосферы. М., 1991. 530 с.

где K – коэффициент, позволяющий произвести временную интеграцию разовых и многолетних исследований;

$C_{\text{эп.}}(N \text{ период})$ – среднее значение концентрации примеси в точках эпизодического контроля состояния атмосферного воздуха за период с 2014 по 2016 гг. (для данных, полученных в ходе разового мониторинга в 2016 г.), с 2016 по 2018 г. (для данных, полученных в ходе разового мониторинга в 2018 г.), с 2018 по 2022 гг. (для данных, полученных в ходе разового мониторинга в 2022 г.);

$C_{\text{эп.разовые}}$ – среднее значение в точках эпизодического контроля, полученное в период разовых исследований, проводимых в теплый период 2016, 2018 и 2022 гг.

Необходимо отметить, что для всех периодов значения данного коэффициента составили с округлением значение 1,2, что свидетельствует о репрезентативности значений показателей, полученных в результате разового отбора проб.

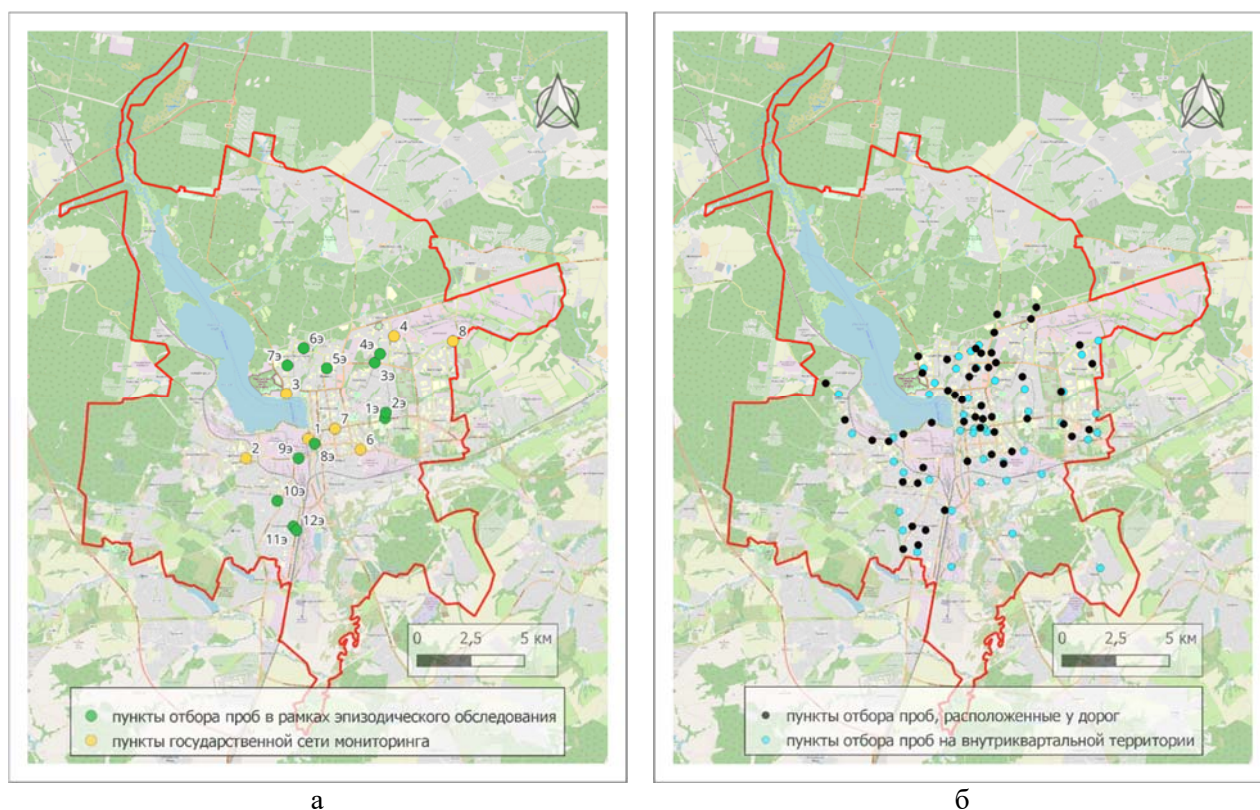


Рис. 1. Расположение постов: а) государственной сети мониторинга Удмуртского ЦГМС – Филиала ФГБУ «Верхне-Волжское УГМС» и пунктов наблюдений в рамках программы эпизодического обследования на территории г. Ижевска с 2014 по 2022 гг. (за исключением 2020 г.); б) наблюдений в рамках программы разового исследования состояния атмосферного воздуха на территории г. Ижевска, проводимого в теплый период года 2016, 2018 и 2022 гг.

Характеристика состояния атмосферного воздуха с применением методов математического моделирования. Определение расчетным путем среднегодовых значений концентраций загрязнителей в атмосферном воздухе состоит из 2 этапов:

1. Определение объемов выбросов от стационарных и передвижных источников;
2. Расчет среднегодовых значений концентрации примеси, формируемых выбросами стационарных и передвижных источников.

Определение объемов выбросов от стационарных источников. Среди ведущих стационарных источников выбросов города Ижевска можно назвать следующие предприятия: ПАО «Ижсталь», ПАО «Т Плюс» (ТЭЦ-1, ТЭЦ-2), Общество с ограниченной ответственностью «ЛАДА Ижевский Автомобильный Завод» (ООО «ЛАДА Ижевск»), АО «Ижевский механический завод», АО «Ижевский мотоцикл-завод «Аксион-Холдинг», ГК «Римера», АО «ИЭМЗ «КУПОЛ», АО «Ижевский радиозавод», АО

«Ижевский завод пластмасс» [16]. Динамика объемов суммарных выбросов от стационарных источников, расположенных на территории г. Ижевска, за последние 10 лет представлена на рис. 2.

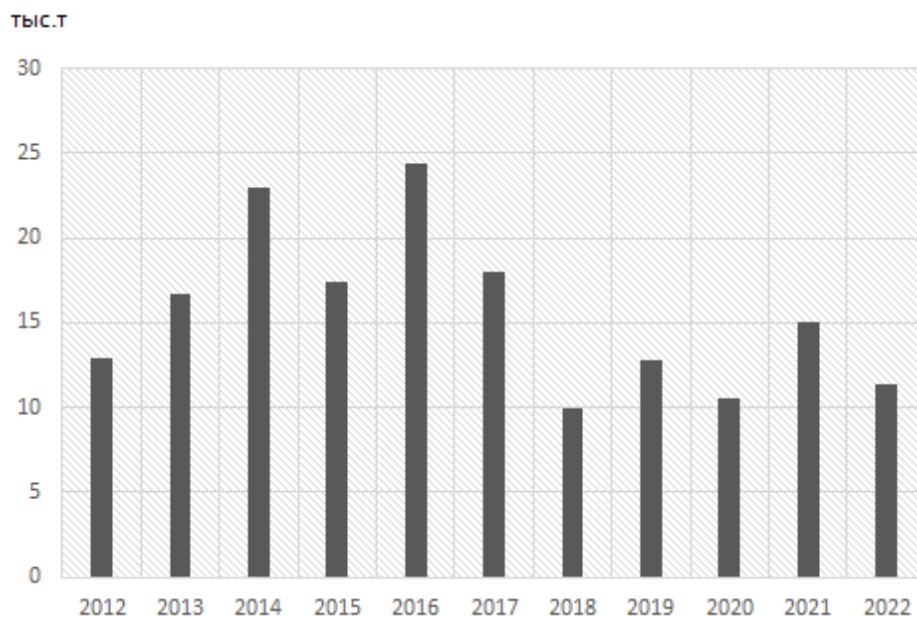


Рис. 2. Динамика объемов валовых выбросов от стационарных источников на территории г. Ижевска за период с 2012 по 2022 гг.

По данным реестра НВОС, валовые выбросы от всех производств (1, 2 и 3 категорий) в 2021 г. составили 35020,6 т/год. Наибольший вклад (в объемном измерении) в загрязнение атмосферного воздуха города Ижевска в 2022 г. вносили предприятия 2 категории (97 %), на предприятия 1 категории приходилось 2 % всех выбросов, на предприятия 3 категории – чуть более 1 %. Необходимо отметить, что несмотря на значительное количество зарегистрированных на территории города объектов 3 категории (их количество в 5 раз больше, чем суммарно предприятий 1 и 2 категории), в рамках оценки уровней загрязнения атмосферы посредством математического моделирования, данные источники не учитывались в связи с незначительным вкладом в суммарные выбросы.

Расчет объемов выбросов от передвижных источников. Мощность эмиссии загрязняющих веществ (ЗВ) в отработавших газах отдельно для каждого газообразного вещества, согласно «Методике...»⁵, определялась по формуле (2):

$$M_{\text{п}} = \frac{L}{1200} \sum_1^K M_{Ki}^n * G_K * r_{Vki}, \quad (2)$$

где: L – протяженность автодороги (участка автодороги). В рамках данного исследования был взят участок дороги протяженностью 1 км;

M_{Ki}^n – удельный пробеговый выброс i -го загрязняющего вещества k -й группы транспортного средства. Значения определялись согласно «Методике...»;

G_K – фактическая интенсивность движения, которая определяется как количество транспортных средств каждой из k групп, проходящих через фиксированное сечение выбранного участка автодороги за единицу времени (20 минут) в двух направлениях по всем полосам движения. Полученные значения интенсивности, интегрированные за период 10 минут, умножались на 2;

r_{Vki} – поправочный коэффициент, учитывающий зависимость изменения количества выбрасываемых загрязняющих веществ от средней за период осреднения скорости движения автотранспортного потока (км/час) на выбранном участке автодороги. Минимальная скорость движения, согласно «Методике...», в «пробке» принимается равной 5 км/час;

k – количество групп транспортных средств.

⁵ Методика определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от передвижных источников для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха, утвержденная Приказом Минприроды России от 27.11.2019 № 804., М., 2019. 10 с.

Среднегодовые значения суммарной интенсивности и скорости потока по крупнейшим автодорогам г. Ижевска были получены в ходе натурных исследований, проведенных сотрудниками и студентами кафедры экологии и природопользования. На рис. 3 представлены значения среднегодовой интенсивности транспортного потока. Скорость потока в период исследования варьировала от 20 до 65 км/ч.



Рис. 3. Среднегодовые значения суммарной интенсивности транспортных потоков на крупных автодорогах города Ижевска

В среднем для автодорог города Ижевска характерна структура транспортного потока с значительным преобладанием легкового автотранспорта, типичная для большинства крупных городов [17–19]. Легковые автомобили составляют 93 % от всех автотранспортных средств. На долю микроавтобусов (грузоподъемностью до 3,5 т) и грузовых автомобилей (грузоподъемностью более 12 т) приходится по 1 %. Грузовой автотранспорт (грузоподъемностью от 3,5 до 12 т) в общей структуре потока составляет чуть менее 3 %. На автобусы (грузоподъемностью более 3,5 т) приходится около 2 %.

В тоже время, в связи с высокой пространственной дифференциацией данного показателя, средние значения структуры транспортного потока для города не являются репрезентативными для конкретного участка дороги. Анализируя структуру транспортных потоков, можно выделить следующие типы автодорог города:

1. «Транзитно-легковой тип». Структура транспортного потока более чем на 95 % представлена легковым автотранспортом. На микроавтобусы и грузовые автомобили грузоподъемностью от 3,5 до 12 т суммарно приходится не более 4 % (в т. ч. микроавтобусы 1–2 % и грузовые автомобили до 3,5 т – 1–2 %). На долю грузовых автомобилей грузоподъемностью более 12 т и автобусов приходится суммарно не более 2 %. В свою очередь данный тип по интенсивности транспортного потока можно разделить на 2 подтипа:

1а. Крупнейшие автодороги, осуществляющие связь отдельных, удаленных районов города между собой, с центром. Это многополосные автодороги (в общем случае более 6 полос суммарно в обоих направлениях) с высокой интенсивностью транспортного потока (общая интенсивность

транспортного потока составляет значение более 750 автотранспортных средств / 20 мин.). Примером автодорог, относящихся к данному подтипу, являются улицы 10 лет Октября, 40 лет Победы, К. Либкнехта, Кирова (кроме участка от ул. Песочной до ул. 30 лет Победы), Пушкинская (участок от пересечения ул. Ленина до ул. Холмогорова).

1б. Менее крупные автодороги (количество полос в обоих направлениях 4 и менее), являющиеся связующим звеном между крупнейшими автодорогами и пролегающие на внутриквартальной территории. Интенсивность транспортного потока таких дорог составляет от 300 до 650 автотранспортных ед. / 20 мин. Примером автодорог, относящихся к данному подтипу, являются улицы Автозаводская, Дзержинского, Коммунаров, Красноармейская, Лихвинцева, Майская, Московская.

2. «Переходный тип». Легковые автомобили составляют 90–95 % от общего транспортного потока. На долю микроавтобусов (грузоподъемностью до 3,5 т) приходится 1–2 %. Возрастает доля малотоннажного грузового автотранспорта (доля грузового автотранспорта грузоподъемностью 3,5–12 т составляет 2–4 %). Доля грузового автотранспорта грузоподъемностью более 12 т и автобусов составляет по 1–2 %. Интенсивность транспортного потока на улицах такого типа варьирует в диапазоне 300–500 транспортных ед. / 20 мин. К такому типу относятся улицы Камбарская, Грибодова, Пастухова, Степная, Совхозная.

3. «Грузотранспортный тип». Легковые автомобили составляют 80–95 % от общего транспортного потока. На грузовые автомобили (грузоподъемностью 3,5–12 т и более 12 т) суммарно приходится 6–19 % от общего транспортного потока. Доля автобусов и микроавтобусов составляет 2–4 %. Интенсивность транспортного потока варьирует для разных участков дорог от 500 до 1350 транспортных ед. / 20 мин. К данному типу автодорог относятся улицы Магистральная, Маяковского, Областная, Пойма, Удмуртская, Воткинское шоссе, Сарапульский и Якшур-Бодьинский тракт, Азина, Гагарина, Чугуевского и т. д. Автодороги данного типа являются связующим звеном между городской и пригородной транспортной системой.

4. «Пассажиротранспортный тип». Доля легкового транспорта составляет 80–95 %. На грузовые автомобили приходится 0–1 %. Суммарная доля пассажирского автотранспорта составляет 5–9 % (в т. ч. микроавтобусов 1–3 %, автобусов грузоподъемностью более 3,5 т – 5–8 %). Интенсивность транспортного потока варьирует в диапазоне от 650 до 1100 транспортных ед. / 20 мин. Для данного типа автодорог значительную роль в формировании транспортного потока играют внутригородские пассажирские перевозки. Необходимо отметить низкую роль в пассажиропотоке города Ижевска маршрутного такси, что выражается в относительно малой доле микроавтобусов в общей структуре потока (1–2 %). К автодорогам такого типа относятся улицы Советская, Холмогорова, Петрова, Клубная, Ворошилова, Ленина (на участке от ул. Орджоникидзе до ул. Камбарская).

Расчет среднегодовых значений концентрации примеси, формируемых выбросами стационарных источников. Согласно «Методам расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе» (далее «Методы...»)⁶ максимальная приземная концентрация ЗВ См при выбросе от единичного точечного источника будет рассчитываться по формуле (3):

$$C_m = \frac{A \cdot M \cdot F \cdot t \cdot n \cdot \eta}{H^2 \cdot \sqrt[3]{V_1 \cdot \Delta T}} \quad (3)$$

где: А – коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы, определяющий условия горизонтального и вертикального рассеивания ЗВ в атмосферном воздухе. Для территории г.Ижевска коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы, согласно «Методам...», имеет значение 160;

М – масса ЗВ, выбрасываемого в атмосферный воздух в единицу времени, г/с;

F – безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседания ЗВ (газообразных и аэрозолей, в т. ч. твердые частицы) в атмосферном воздухе. В общем случае коэффициент имеет значение 1, а для бенз(а)пирена и взвешенных веществ $PM_{2,5}$ = 3;

η – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности (определяемый в соответствии с главой 7 «Методов...»);

H – высота источника выброса, м;

⁶ Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе, утв. приказом Минприроды России от 06.06.2017 № 273. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456074826> (дата обращения: 19.11.2023).

V_1 – расход ГВС, определяемый по формуле (4) согласно «Методам...», $\text{м}^3/\text{с}$. Для расчета используется значение диаметра устья источника выброса (m) и скорость выхода ГВС ($\text{м}/\text{с}$);

ΔT – разность между температурой, выбрасываемой ГВС (T_g), и температурой атмосферного воздуха (T_b), $^{\circ}\text{C}$;

m и n – безразмерные коэффициенты, учитывающие условия выброса из устья источника выброса;

$$V_1 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \omega_0, \quad (4)$$

где D – диаметр устья источника выброса, m ; ω_0 – средняя скорость выхода ГВС из устья источника выброса, $\text{м}/\text{с}$.

Технические характеристики стационарных источников (масса ЗВ, поступающих в атмосферный воздух от стационарных источников; высота источника; диаметр устья источника; скорость выхода ГВС; температура ГВС) определялись на основании значений, публикуемых в государственном реестре объектов негативного воздействия (НВОС) для предприятий 1 и 2 категории.

Приземная концентрация ЗВ в атмосфере C_x на расстоянии x к оси источника выброса определяется по формуле (5):

$$C_x = S_1 \cdot C_m \quad (5)$$

Приземная концентрация ЗВ в атмосфере C_y на расстоянии y к оси источника выброса определяется по формуле (6):

$$C_y = S_2 \cdot C_m, \quad (6)$$

где S_1 , S_2 – безразмерный коэффициент, учитывающий скорость ветра и расстояние от источника.

В рамках данного исследования, с учетом используемых технических ресурсов, был выбран шаг расчетной сетки 500 м. При этом, для каждого из источников выброса радиус зоны влияния определялся расстоянием, с которого концентрация была меньше 0,05 ПДК_{м.р.}

Расчет среднегодовых значений концентрации примеси, формируемых выбросами передвижных источников. При реализации методов математического моделирования в оценке загрязнения атмосферного воздуха выбросами от автотранспорта необходимо учитывать ряд особенностей:

1) выбросы в атмосферу осуществляются от большого количества взаимно пересекающихся линейных источников (автомобильные дороги);

2) выбросы загрязняющих веществ от автотранспортных потоков осуществляются вблизи поверхности земли, что значительно снижает интенсивность рассеяния поллютантов;

3) на интенсивность эмиссии и последующий процесс рассеяния загрязняющих веществ (ЗВ) от автотранспорта влияет значительное количество факторов, учет которых затруднен для большой по площади территории: структура и интенсивность автотранспортных потоков, параметры автомобильных дорог (в том числе локализация в пространстве), наличие препятствий для переноса ЗВ (окружающие здания и прочие объекты), метеорологические условия, орография местности и т. п. Данные факторы приводят к формированию значительной пространственно-временной неоднородности загрязнения атмосферного воздуха в пределах городской среды [21].

Согласно «Методам...» учет выбросов линейных источников осуществляется через формулу (7):

$$c_1(x, y) = \int_L \frac{M(l) \cdot c'(x - \xi, y - \eta)}{V(l)} dl \quad (7)$$

где: $M(l)$ и $V(l)$ – значения мощности выброса $M(t)$ и расход ГВС $V(t)$, соответствующие тому моменту времени t , когда перемещающийся источник выброса находится в точке $l = (\xi, \eta)$;

c' – вычисленная по формуле (8.2), приведенной в «Методах...», концентрация в точке (x, y) от одиночного источника выброса ЗВ единичной мощности, располагающегося в точке (ξ, η) . При этом, под линейным источником выброса аппроксимируются выбросы от точечного источника, который за время осреднения перемещается с положительной скоростью вдоль отрезка L . Таким образом, автодорога была представлена как ряд расположенных на одной линии точечных источников на определенном расстоянии друг от друга. В рамках данного исследования километровый участок дороги был представлен 1000 взаимовлияющих друг на друга точечных источников.

Согласно «Методам...» для низких и приземных источников выбросов, концентрация C по оси x всегда будет равна C_m (максимальной приземной разовой концентрации). Таким образом, определение концентрации по оси x будет осуществляться по формуле (3). Согласно «Методам...», высота приземного источника была взята за величину 2 м. При расчете расхода ГВС V_1 , в связи с незначи-

тельностью влияния на конечный результат, было допущено следующее упрощение: диаметр выхлопной трубы был взят в качестве константы и равен средне пропорциональному структуре потока значению (0,13 м), температура ГВС была взята равной 450 °С.

Приземная концентрация ЗВ в атмосфере C_y на расстоянии y к оси отрезка дороги определяется по формуле (8):

$$C_y = S_2 \cdot C_m \cdot \theta \quad (8)$$

где: θ – коэффициент, введенный автором и учитывающий снос ЗВ от полотна дороги. Значение коэффициента принималось равным 0, если разность значений дирекционных углов дороги и направления ветра = 270° или 90°, в остальных случаях $\theta = 1$;

S_2 – безразмерный коэффициент, учитывающий скорость ветра и расстояние от источника.

При оценке воздействия автотранспортных потоков на прилегающую территорию, для исследуемого участка была создана расчетная сетка с шагом в 10 метров (технически максимально возможная на данный момент детальность). Это позволило оценить вклад выбросов автотранспорта в концентрации загрязняющих веществ в каждой точке на расстоянии до 50 метров от источника. Выделение предельной дальности расчета рассеяния выбросов от автодороги опирается на результаты ранее проведенных исследований [21], согласно которым воздействие от автотранспортного потока прослеживается на прилегающей территории на расстоянии не более 50 метров.

Написание программного кода, при помощи которого производился расчет концентраций ЗВ г. Ижевска, осуществлялось рабочей группой в составе студентов ФГБОУ ВО «УдГУ» Коробейниковой А.А., Амикишиевой В.В. и ученика ЧУ СОШ «Столичный – КИТ» Зуева А.М. под руководством автора.

Результаты и их обсуждение

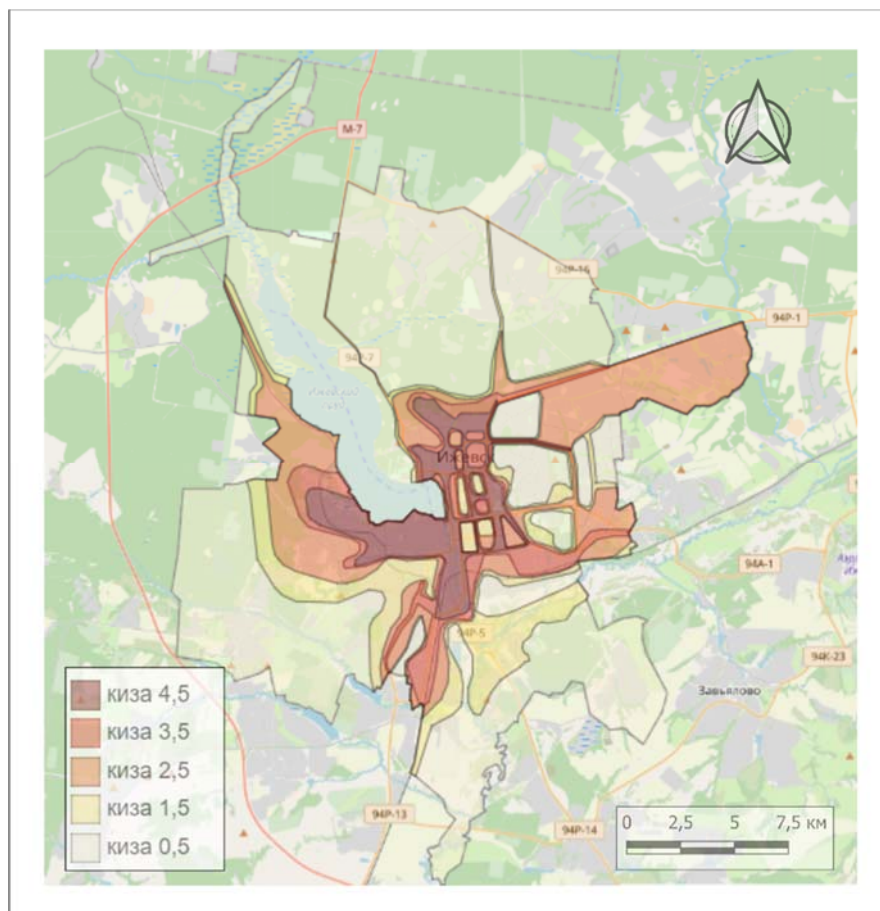


Рис. 4. Карта среднегодовых значений КИЗА г. Ижевска в 2022 г., полученная в ходе натурных исследований

Для оценки среднегодовых уровней загрязнения атмосферного воздуха использовался показатель КИЗА (комплексный индекс загрязнения атмосферного воздуха). На базе проведенных натурных разовых исследований была получена карта значений КИЗА за 2022 г. (рис. 4).

Анализируя полученные результаты, можно выделить несколько зон с разными уровнями загрязнения. Самые высокие значения КИЗА (более 4) отмечались в пределах центральной и северо-восточной частей города. Высокий уровень загрязнения атмосферы на указанных территориях связан с выбросами промышленных предприятий (например, таких как ПАО «Ижсталь» и ТЭЦ-1) и выбросами от автодорог, характеризующихся в этой части города высокой степенью загруженности. При этом в других частях города, вблизи крупных автодорог, значение КИЗА также превышало 4 (и достигало экстремальных значений 10 и более).

В южной части города расположены предприятия ФГУП «Ижевский механический завод» и ОАО «Ижнефтемаш». С выбросами данных предприятий связано формирование уровней загрязнения атмосферы, характеризующихся значениями КИЗА 3–4. Такие же уровни загрязнения характерны для восточной части города, где располагается крупный промышленный узел, представленный такими предприятиями, как ООО «Объединенная автомобильная группа» (ИЖАВТО), ОАО «Ижевский завод пластмасс», ТЭЦ-2.

Относительно невысокий уровень загрязнения (КИЗА 2–3) отмечается на территориях, располагающихся на удалении от крупных промышленных зон. С точки зрения типов природопользования, данные территории относятся к селитебной зоне с многоэтажной застройкой.

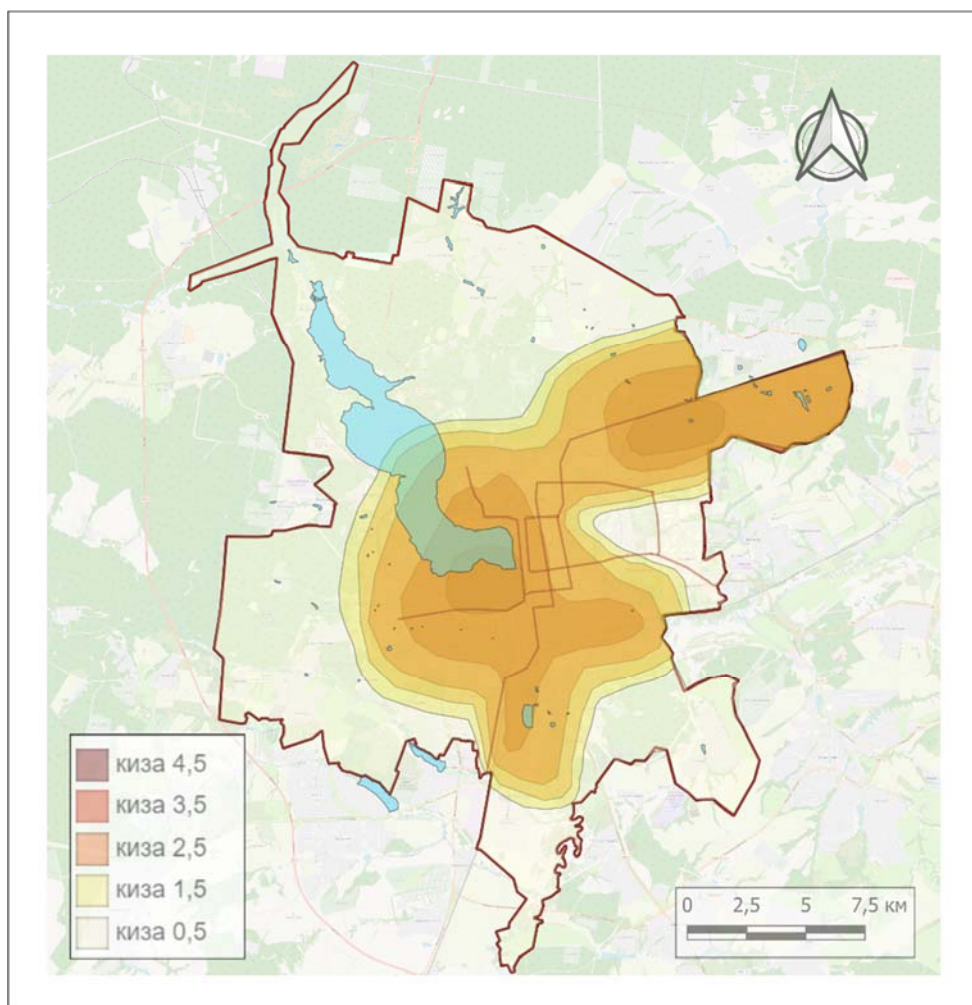


Рис. 5. Карта среднегодовых значений КИЗА г. Ижевска в 2022 г., полученная с применением методов математического моделирования

Низкий уровень загрязнения атмосферного воздуха (менее 1) отмечался в пределах рекреационных зон и селитебных территорий с малоэтажной застройкой («частного сектора»). Необходимо отметить, что несмотря на значительный вклад в загрязнении атмосферного воздуха автотранспорта, для ряда территорий города ведущим фактором в формировании повышенных значений загрязнения атмосферы являются выбросы от стационарных источников.

Карта значений КИЗА, полученная с применением методов математического моделирования, представлена на рис. 5.

Анализ рис. 5 показал некоторые элементы пространственной генерализации, присутствующие при создании картографического материала с применением методов математического моделирования. Верификация значений КИЗА, полученных расчётным путем и в ходе натурных исследований, показала сходимость результата на 72 %. Расхождения в полученных значениях, вероятнее всего, связаны с неполным учетом стационарных источников выбросов (представленных в реестре НВОС), неизбежными погрешностями, связанными с аппроксимацией условий выбросов и рассеяния, заложенными в методике расчета.

Заключение

Таким образом, в ходе проведенного исследования была проведена оценка возможности использования инструментов математического моделирования в создании карт загрязнения атмосферного воздуха городской среды на примере г. Ижевска. Несмотря на имеющиеся расхождения в полученных значениях, в условиях дефицита пространственных данных об уровне загрязнения атмосферного воздуха по данным мониторинговой сети (связанных с высокой трудоемкостью и дороговизной организации наблюдений), результаты математического моделирования рассеяния примеси от источников выбросов могут выступать как дополнительный информационный ресурс при принятии административных решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Штриплинг Л.О., Баженов В.В. Автоматизированная система мониторинга выбросов предприятий нефтеперерабатывающего профиля // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2014. №7. С. 5–10.
2. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2023. 215с. URL: <https://www.meteorf.gov.ru/product/infomaterials/90/?year=2022&ID=90> (дата обращения: 25.08.2023).
3. Доклад об экологической обстановке в г. Ижевске в 2016 г. / А.Г. Ковальчук, Т.Н. Ермакова, Д.С. Рябов, Л.А. Семакова, Ю.В. Шельпякова. Ижевск, 2017. 80 с.
4. Ежегодник состояния загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2020 г. URL: http://voeikovmgo.ru/images/stories/publications/2021/ejegodnik_zagr_atm_2020.pdf (дата обращения: 25.08.2023).
5. Экологи края обеспокоены загрязнением воздуха в Красноярске / Научно-практический портал «Экология производства» (дата публикации 25.10.2005). URL: <https://www.ecoindustry.ru/news/view/4741.html> (дата обращения: 21.08.2023).
6. Аббасова Е.В., Ерохина Е.В. Право на достоверную информацию о состоянии окружающей среды // Вестник совета молодых ученых и специалистов Челябинской области. 2019. Т. 1, № 4(23) С. 3–8.
7. Онлайн карта «Breezometer». URL: <https://www.breezometer.com/air-quality-map/ru/air-quality/united-states/new-york> (дата обращения: 19.08.2023).
8. Онлайн карта «Эковизор». URL: <http://online.russiangureens.ru> (дата обращения: 19.08.2023).
9. R-NOX. Air Monitoring System. URL: <https://r-nox.ru/> (дата обращения: 25.08.2023).
10. Юдинцев И.Д. Экологическая повестка как инструмент политического манипулирования в условиях гибридных войн // Политконсультант. 2022. Т. 2, № 2. URL: <https://politicjournal.ru/PDF/01PK222.pdf> (дата обращения: 21.08.2023).
11. Осокин Р.В. Политическое манипулирование в сфере экологической безопасности в современной России: дис. ... канд. полит. наук. Саратов, 2008. 163 с.
12. AirViro. URL: <https://www.airviro.com/airviro/> (дата обращения: 29.08.2023).
13. The history of AirWare. URL: <http://airware.org/aboutus.asp> (дата обращения: 29.08.2023).
14. Slordal L.V., Macinnes H., Krognes T. The Air Quality Management System AirQUIS // Information Technologies in Environmental Engineering. 2006. Pp. 21–33.
15. EnviMan Software (AQM). URL: <https://www.opsis.se/en/Products/Products-AQM/EnviMan-Software> (дата обращения: 29.08.2023).
16. Семакина А.В. Анализ загрязнения атмосферного воздуха в Ижевске // Вестн. Удм. ун-та. Сер. Биология. Науки о Земле. 2018. Т. 28, вып. 1. С. 77–85.

17. Коровина Е.В., Голунков Ю.В. Структура транспортных потоков г. Ульяновска и оценка загрязнения атмосферы города выбросами автотранспорта // Успехи современного естествознания. 2007. № 9. С. 93–94.
18. Нестеренко Д.Х. Исследование влияния структуры автотранспортного потока на эффективность использования участка улично-дорожной сети // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2019. № 1. С. 90–96.
19. Нехайчик О.В., Шевырова Н.И. Анализ дорожно-транспортной инфраструктуры Московского мегаполиса: от теории к практике // Вопросы государственного и муниципального управления. 2012. № 2. С. 202–213.
20. Антропов К.М. Математические модели загрязнения атмосферного воздуха мегаполиса и промышленного центра выбросами автотранспорта и промышленных предприятий: автореф. дисс. ... к. ф.-м. наук. Екатеринбург, 2012. С. 12–20.
21. Семакина А.В. Особенности учета влияния междугородной автотранспортной сети на атмосферное загрязнение // Вестник Удмуртского Университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2008. Вып. 1. С. 25–30.

Поступила в редакцию 20.11.2023

Семакина Алсу Валерьевна, кандидат географических наук, доцент,
доцент кафедры экологии и природопользования
ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет»
E-mail: alsen13@list.ru

A. V. Semakina

MAPPING OF ATMOSPHERIC AIR POLLUTION OF THE URBAN ENVIRONMENT

DOI: 10.35634/2412-9518-2024-34-1-41-53

A quantitative assessment of the level of atmospheric air pollution in Izhevsk was carried out through field studies (according to the program of a one-time and episodic survey) and using mathematical modeling methods. Zones with different levels of pollution and varying degrees of influence of pollution factors have been identified. Verification of the CIS values obtained by calculation and in the course of field studies showed the convergence of the result by 72%. The discrepancies in the obtained values are most likely due to incomplete accounting of stationary emission sources (presented in the register of NVOS), unavoidable errors associated with the approximation of emission and scattering conditions laid down in the calculation methodology.

Keywords: atmospheric air, urban environment, field studies, mathematical modeling, Izhevsk.

REFERENCES

1. Shtripling L.O., Bazhenov V.V. [Automated system of emissions monitoring of oil refining enterprises], in *Zashchita okruzhayushchey sredy v neftegazovom komplekse* [Environmental protection in oil and gas complex], 2014, no. 7, pp. 5-10 (in Russ.).
2. *Obzor sostoyaniya i zagryazneniya okruzhayushchey sredy v Rossiyskoy Federatsii* [Overview of the state and pollution of the environment in the Russian Federation], Moscow: Roshydromet, 2023. 215 p. Available at: <https://www.meteorf.gov.ru/product/infomaterials/90/?year=2022&ID=90> (accessed: 25.08.2023) (in Russ.).
3. Koval'chuk A.G., Ermakova T.N., Ryabov D.S., Semakova L.A., Shel'pyakova Yu.V. *Doklad ob ekologicheskoy obstanovke v g. Izhevsk v 2016 g.* [Report on the environmental situation in Izhevsk in 2016], Izhevsk, 2017. 80 p. (in Russ.).
4. *Ezhegodnik sostoyaniya zagryazneniya atmosfery v gorodakh na territorii Rossii za 2020 g.* [Yearbook of the state of atmospheric pollution in cities in Russia for 2020.], Available at: http://voeikovmgo.ru/images/stories/publications/2021/ejegodnik_zagr_atm_2020.pdf (accessed: 25.08.2023) (in Russ.).
5. *Ekologi kraya obespokoeny zagryazneniem vozdukha v Krasnoyarske, Nauchno-prakticheskiy portal "Ekologiya proizvodstva"* [Environmentalists of the region are concerned about air pollution in Krasnoyarsk / Scientific and practical portal "Ecology of production"], Available at: <https://www.ecoindustry.ru/news/view/4741.html> (accessed: 21.08.2023) (in Russ.).
6. Abbasova E.V., Erokhina E.V. [Right to the reliable information on the condition of the environment], in *Vestnik soveta molodykh uchenykh i spetsialistov Chelyabinskoy oblasti*, 2019, vol. 1, no. 4(23), pp. 3-8 (in Russ.).
7. *Onlayn karta «Breezometer»* [Online map "Breezometer"], Available at: <https://www.breezometer.com/air-quality-map/ru/air-quality/united-states/new-york> (accessed: 19.08.2023) (in Russ.).
8. *Onlayn karta «Ekovizor»* [Online map "Ecovisor"], Available at: <http://online.russiangureens.ru> (accessed: 19.08.2023) (in Russ.).
9. R-NOX. Air Monitoring System. Available at: <https://r-nox.ru/> (accessed 25.08.2023).

10. Yudin I.D. [Environmental agenda as a tool of political manipulation in the context of hybrid wars], in *Political Science and Technology*, 2022, 2(2): 01PK222. Available at: <https://politicjournal.ru/PDF/01PK222.pdf>. (accessed: 21.08.2023) (in Russ.).
11. Osokin R.V. [Political manipulation in the field of environmental safety in modern Russia], Cand. Politic. sci. diss., Saratov, 2008, 163 p. (in Russ.).
12. AirViro. Available at: <https://www.airviro.com/airviro/> (accessed: 29.08.2023).
13. The history of AirWare. Available at: <http://airware.org/aboutus.asp> (accessed: 29.08.2023).
14. Slordal L.V., Macinnes H., Kroghes T. The Air Quality Management System AirQUIS, in *Information Technologies in Environmental Engineering*, 2006, pp. 21-33.
15. EnviMan Software (AQM). Available at: <https://www.opsis.se/en/Products/Products-AQM/EnviMan-Software> (accessed: 29.08.2023).
16. Semakina A.V. [The analysis of pollution of atmospheric air in Izhevsk], in *Vestn. Udmurt. Univ. [Bulletin of the Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences]*, 2018, vol. 28, iss. 1, pp. 77-85 (in Russ.).
17. Korovina E.V., Golunkov Yu.V. *Struktura transportnykh potokov g. Ul'yanovska i otsenka zagryazneniya atmosfery goroda vybrosami avtotransporta* [The structure of transport flows of Ulyanovsk and the assessment of air pollution of the city by vehicle emissions], in *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2007, no. 9, pp. 93-94 (in Russ.).
18. Nesterenko D.H. [Investigation of the influence of the structure of motor traffic on the efficiency of the use of the road network section], in *Intellect. Innovacii. Investicii [Intellect. Innovations. Investments]*, 2019, no. 1, pp. 90-96 (in Russ.).
19. Nekhaychik O.V. Shevyrova N.I. *Analiz dorozhno-transportnoy infrastruktury Moskovskogo megapolisa: ot teorii k praktike* [Analysis of the road transport infrastructure of the Moscow metropolis: from theory to practice], in *Voprosy gosudarstvennogo i municipal'nogo upravleniya*, 2012, no. 2, pp. 202-213 (in Russ.).
20. Antropov K.M. [Mathematical models of atmospheric air pollution of megalopolis and industrial center by emissions of motor transport and industrial enterprises], Abstract of diss. Cand. Physical and Mathematical sci, Yekaterinburg, 2012, pp. 12-20 (in Russ.).
21. Semakina A.V. [Particularities of the account of the influence interurban car roads on atmospheric contamination], in *Vestn. Udmurt. Univ. Ser. Biol. Nauki o Zemle [Bulletin of the Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences]*, 2008, iss. 1, pp. 25-30 (in Russ.).

Received 20.11.2023

Semakina A.V., Candidate of Geography, Associate Professor
at Department of Ecology and Nature Management
Udmurt State University
Universitetskaya st., 1/1, Izhevsk, Russia, 426034
E-mail: alsen13@list.ru