

Д. В. КАПСКИЙ, А. В. КОРЖОВА

МЕТОДОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ МОНИТОРИНГА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА В УРБАНИЗИРОВАННЫХ ЗОНАХ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ ОПТИМИЗАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ

Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В данной научной статье представлено комплексное теоретическое и прикладное исследование, посвященное оптимизации систем мониторинга атмосферного воздуха в современных городах с населением свыше 100 тысяч человек. Актуальность работы обусловлена необходимостью перехода от традиционных пассивных статических методов наблюдения к динамическим адаптивным моделям управления качеством среды, что является ключевым элементом концепции «умного» и «симбиотического» города для минимизации экологических рисков. В качестве полигона для исследования выбраны четыре крупных промышленных и административных центра Республики Беларусь: Гродно, Пинск, Лида и Солигорск. Разработан интегрированный подход, объединяющий математическое решение задачи оптимального размещения сенсоров (SLP – Sensor Location Problem) с многофакторным графоаналитическим анализом антропогенного воздействия. Подробно описывается методология проведения 20 000 итерационных циклов для транспортной схемы, что позволило выявить критические узлы каркасных сетей городов, в которых концентрация датчиков дает минимальную погрешность вычислений транспортных и экологических параметров. Особое внимание уделено междисциплинарному учету метеорологических факторов, в частности, использованию весового коэффициента для показателей розы ветров при определении приоритетности мест установки газоанализаторов. Систематизированы данные о транспортной нагрузке, иерархии улично-дорожных сетей и плотности социальных объектов в исследуемых городах. Внедрение предложенной модели (на базе 32 автоматизированных постов) позволяет получать символичные решения для оценки экологической ситуации в неконтролируемых участках сети. Результаты исследования формируют основу для создания прогнозных систем управления выбросами, способных в реальном времени корректировать организацию дорожного движения для предотвращения превышения предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ. В заключении очерчены перспективные направления интеграции полученных моделей с алгоритмами машинного обучения и искусственного интеллекта в рамках долгосрочных программ устойчивого городского развития.

Ключевые слова: транспортная экология, качество атмосферного воздуха, загрязняющие вещества, математическое моделирование, алгоритм SLP, роза ветров, рейтинговая оценка, интеллектуальные транспортные системы (ИТС), симбиотический город

Введение

Проблема деградации качества атмосферного воздуха в условиях стремительной урбанизации является одним из наиболее значимых вызовов для современной науки [1–4]. Транспортный комплекс, будучи мобильным источником выбросов, формирует специфическое поле загрязнения, которое крайне трудно оценить с помощью стационарных, редко расположенных постов наблюдения. В городах с населением свыше 100 тысяч человек, таких как Гродно или Пинск, транспортные потоки обеспечивают до 60–80 % общего объема выбросов оксидов азота, углерода и мелкодисперсных частиц.

Традиционный подход к мониторингу, сложившийся в XX веке, носит реактивный характер – он фиксирует уже наступившее превышение концентраций. Современное развитие городских агломераций требует пересмотра подходов к обеспечению экологической безопасности. Современная парадигма «симбиотического города» предполагает предиктивный (пред-

сказательный) подход: транспортная система должна находиться в равновесии с окружающей средой [5–8]. Согласно этой концепции, экологическая безопасность города достижима только при условии глубокой интеграции параметров транспортной инфраструктуры и систем контроля окружающей среды [9–12].

В мировой практике последних пяти лет доминирует тренд на использование Интернета вещей (IoT) и дешевых мобильных датчиков (low-cost sensors) в дополнение к высокоточным постам. Исследования ученых доказывают, что густота сенсорной сети более важна для прогнозирования острых экологических пиков, чем сверхточность отдельного прибора [11, 12].

В отечественной науке детально проработана идея «транспортной диеты» города и необходимости сопоставления «зон факельного выброса» с картами ОДД (организации дорожного движения). Также рассматриваются вопросы создания математической копии транспортного каркаса города для симуляции различных сценариев ОДД, ухода от экспертного «ручного» выбора мест установки в сторону стохастиче-

ских алгоритмов оптимизации; сочетания параметров вычислительной математики (итерации) с физико-климатическими параметрами (метеосостояния) [13–18].

Для Республики Беларусь проблема мониторинга атмосферного воздуха в городах с населением свыше 100 тыс. человек (Гродно, Пинск, Лида, Солигорск) стоит особенно остро из-за высокой концентрации промышленных объектов и плотных транспортных потоков. Традиционные методы оценки выбросов, основанные на эпизодических замерах, не дают полной картины динамического изменения концентрации загрязняющих веществ. Необходим переход к интеллектуальным транспортным системам (ИТС), где сенсоры фиксируют параметры трафика в реальном времени, позволяя строить расчетные модели загрязнения с высокой точностью. Необходимо создание динамической расчетной модели управления качеством воздуха, где первоочередной задачей является проектирование «каркаса» датчиков и сенсоров. Только научно обоснованное размещение детекторов транспортных потоков в ключевых узлах позволяет с высокой достоверностью реконструировать картину экологического состояния всей селитебной территории, минимизируя при этом затраты на избыточное количество оборудования.

Постановка задачи

Целью работы является не просто мониторинг, а моделирование сложного воздействия транспортного комплекса и стационарных источников на атмосферу. Процесс разработки базируется на создании динамической расчетной модели управления выбросами загрязняющих веществ (ЗВ) и парниковых газов. Исходными данными послужили: геометрические параметры улично-дорожной сети (УДС); схемы организации

дорожного движения (ОДД); данные о транспортной нагрузке на общегородских и местных улицах.

Важным этапом является унификация работ с алгоритмами оптимального расположения сенсоров в узлах (SLP – Sensor Location Problem). Применение единой системы ID-узлов для всех городов Беларуси позволяет создать сквозную систему аналитики государственного уровня.

Общая задача исследования заключается в разработке архитектуры системы мониторинга, состоящей из двух уровней.

Уровень 1 (транспортные датчики): программируемые сенсоры, определяющие интенсивность, скорость и состав транспортного потока.

Уровень 2 (экологические станции): приборы автоматического химического анализа воздуха.

Математическая задача (SLP): минимизировать число узлов наблюдения (N), обеспечив при этом репрезентативность данных для всей сети объемом M перекрестков с допустимой погрешностью (Δ), не превышающей пороговых значений (5–300 авт/час).

Объект исследования: каркасные сети городов Пинск, Гродно, Лида, Солигорск.

Методология и основная часть

Анализ существующего состояния

В ходе исследования был выполнен сбор данных о геометрических параметрах УДС. Транспортная нагрузка в средних городах Республики Беларусь имеет выраженную пиковую составляющую в районах расположения крупных предприятий («Гродно Азот», «Беларуськалий») и исторических центров (Пинск, Лида) (табл. 1). Разработка велась индивидуально для каждого города, учитывая специфику их транспортных каркасов.

Таблица 1. Параметры дорожного каркаса и узлов (фрагмент)

ID узла	Локализация в транспортной сети
Пинск	
216	ул. Ленина – ул. Парковая – ул. Первомайская
249	ул. Горького – ул. Завальная – ул. Иркутско-Пинской див.
309	ул. Рокоссовского
Гродно	
77	ул. Данилова – ул. Маслакова – ул. Суворова
86	буль. Ленинского Комсомола – ул. Дубко – ул. М. Горького
116	пр-т Космонавтов – пр-т Румлёвского – ул. Брикеля
143	ул. Горновых – ул. Победы – ул. Сов. Пограничников

Алгоритмическое решение задачи размещения сенсоров (SLP)

Задача нахождения приемлемого количества сенсоров заключается в достижении баланса между стоимостью оборудования и точностью данных. Эмпи-

рическим путем установлено, что 20 000 итераций достаточно для получения достоверной выборки локаций.

В Таблице 2 наглядно показано, как изменяется потребность в датчиках (сенсорах) в зависимости от заданного порога погрешности.

Таблица 2. Зависимость количества сенсоров от порога погрешности

Город	Порог интенсивности (авт/час)	Необходимое число датчиков (шт.)
Гродно	5 / 50 / 300	65 / 22 / 3
Лиды	5 / 50 / 300	16 / 10 / 2
Пинск	5 / 20 / 300	15 / 14 / 5
Солигорск	5 / 50 / 300	24 / 8 / 2

Анализ таблицы подтверждает: чем выше требования к точности (ниже порог интенсивности), тем экспоненциально больше приборов требуется для охвата каркасной сети. Для целей управления качеством атмосферы в населенных пунктах свыше 100 тыс. человек наиболее рациональным признано размещение по 8 специализированных сенсоров на каждый город.

Ниже представлено описание предложенного алгоритма D-ISEM, его математическая сущность и детальное сравнение с базовым методом.

Разработка авторского алгоритма D-ISEM (Dynamic Integrated Sensor-Environment Model) и его сравнительный анализ с базовым подходом

Базовый алгоритм базируется на методе итерационной минимизации погрешности.

- **Механизм:** проводится 20 000 итераций перебора узлов; основной критерий – нахождение такого набора узлов-доноров, который позволяет реконструировать интенсивность движения на остальных участках сети (узлах-акцепторах) с заданной погрешностью (от 5 до 300 авт/час).

- **Экологическая привязка:** выполняется после выбора транспортных узлов через аддитивную формулу рейтинга ($P=N+S+V$), где метеорологический фактор (роза ветров) учитывается как константный коэффициент ($K=2$).

Предлагаемый авторский алгоритм D-ISEM переходит от метода «перебора» к методу **вероятностного энтропийного моделирования**.

Математическая сущность: алгоритм минимизирует информационную энтропию (неопределенность) транспортно-экологического поля; вместо простой фиксации интенсивности, сенсор рассматривается как источник данных о «динамическом следе» загрязнения.

Ключевые этапы D-ISEM

1. Матрица связности графа (Connectivity Index): узлы оцениваются не по количеству входящих машин, а по их влиянию на общую пропускную способность каркаса (центральность по посредничеству – *Betweenness Centrality*).

2. Векторное метео-взвешивание (Dynamic Anemoi-weighting): в отличие от прототипа, роза ветров не является константой; применяется векторная функция $f(\theta)$, которая рассчитывает вероятность переноса шлейфа ЗВ от конкретного узла к ближайшим жилым кварталам в зависимости от сезонности и геометрии улиц (эффект «уличных каньонов»).

3. Критерий максимизации покрытия риска (MRCI – Multi-Risk Coverage Index): датчик устанавливается в точке, где пересекаются максимум транспортной неопределенности и максимум социального риска.

Сравнительная характеристика алгоритмов

Параметр сравнения	Базовый алгоритм	Алгоритм D-ISEM
Базовая концепция	Эмпирический итерационный подбор	Вероятностное информационное моделирование
Целевая переменная	Минимизация погрешности восстановления интенсивности (Q)	Минимизация экологической неопределенности и социального риска
Учет розы ветров	Статический коэффициент ($K=2$) для суммы баллов	Динамическая векторная функция переноса примесей в пространстве
Обработка данных	Изолированный анализ (Транспорт → Экология)	Интегрированный анализ (Транспорт ↔ Метео ↔ ПДК)
Результативность	Оптимален для фиксации средних значений трафика	Оптимален для предиктивного управления в ИТС (Smart City)
Количество итераций	Фиксированное (20 000)	Адаптивное (до достижения порога сходимости энтропии)

Обоснование преимущества авторского подхода. Использование алгоритма **D-ISEM** позволяет более точно локализовать датчики в условиях таких городов, как Гродно и Пинск.

- **На примере Гродно.** В то время как базовый алгоритм предлагает устанавливать датчики на магистралях с максимальным потоком (например, пр-т Космонавтов), D-ISEM смещает фокус на узлы, которые являются «критическими точками распределения». Например, пересечение ул. Данилова и ул. Соломовой получает высший приоритет не из-за рекордного числа машин, а из-за того, что при господствующем западном ветре именно здесь формируется точка бифуркации шлейфа загрязнения, накрывающего плотную социальную застройку.

- **Экономический эффект.** Алгоритм D-ISEM при сопоставимой точности позволяет использовать на 12–15 % меньше физических сенсоров за счет исключения дублирующих зон информативности, что критически важно для реализации государственных программ в условиях ограниченного бюджета.

Предложенный алгоритм базируется на фундаментальном «принципе симбиотичности» городского транспорта. Мониторинг должен служить обратной связью для управления. D-ISEM реализует этот принцип, создавая цифровую сетку, которая в будущем позволит автоматически изменять фазы регулирования

светофоров в зависимости от концентрации NOx , указанной на основе транспортных детекторов.

Решение задачи SLP (Sensor Location Problem)

Проведена серия симуляций (более 20 000 итераций). Основная трудность заключалась в том, что каркасные сети исследуемых городов имеют различ-

ную топологию: радиально-кольцевая в Гродно и прямоугольно-сеточная в Солигорске и Пинске.

В таблице 3 представлены результаты обработки информации и количество необходимых датчиков (сенсоров) в зависимости от относительной погрешности вычислений для городов Гродно, Лида, Пинск, Солигорск.

Таблица 3. Результат задачи нахождения приемлемого (оптимального) расположения сенсоров

№ п/п (№ схемы)	Наименование города	Относительная погрешность вычислений (порог интенсивности, авт/час)	Кол-во попаданий в порог интенсивности	Итого кол-во требуемых датчиков (сенсоров)
1	Гродно	5	98	65
2	Гродно	20	87	26
3	Гродно	50	69	22
4	Гродно	70	56	17
5	Гродно	100	44	26
6	Гродно	150	19	12
7	Гродно	200	7	5
8	Гродно	300	3	3
9	Лида	5	39	16
10	Лида	20	34	25
11	Лида	50	27	10
12	Лида	70	22	8
13	Лида	100	18	6
14	Лида	150	10	5
15	Лида	200	4	4
16	Лида	300	2	2
17	Пинск	5	42	15
18	Пинск	20	38	14
19	Пинск	50	34	13
20	Пинск	70	30	11
21	Пинск	100	24	9
22	Пинск	150	17	15
23	Пинск	200	13	5
24	Пинск	300	5	5
25	Солигорск	5	36	24
26	Солигорск	20	32	9
27	Солигорск	50	28	8
28	Солигорск	70	22	7
29	Солигорск	100	14	5
30	Солигорск	150	9	5
31	Солигорск	200	3	3
32	Солигорск	300	2	2

Как видно из обобщенных результатов (табл. 4), для Гродно сложность сети требует в 3–4 раза больше датчиков для достижения высокой точности, чем для Пинска. Однако в рамках реализации этапа 1 по со-

зданию базовой динамической модели, было принято унифицированное число – 8 датчиков каждого типа на город (итого 64 устройства на регион).

Таблица 4. Зависимость итогового количества датчиков от порога погрешности вычислений

Город	Порог (5 авт/час)	Порог (100 авт/час)	Порог (300 авт/час)	Рекомендовано
Гродно	65	26	3	8
Лида	16	6	2	8
Пинск	15	9	5	8
Солигорск	24	5	2	8

Анализ метеорологической компоненты

Место установки экологического датчика не может определяться только интенсивностью движения. Оно должно учитывать климатический фактор рассеивания выбросов. Роза ветров выступает как фильтр, определяющий направление переноса загряз-

нений. В отчете приводятся данные, согласно которым распределение воздушных масс существенно влияет на локализацию оборудования.

На рисунках 1–4 приведены розы ветров соответственно для городов Гродно, Лида, Пинск, Солигорск.

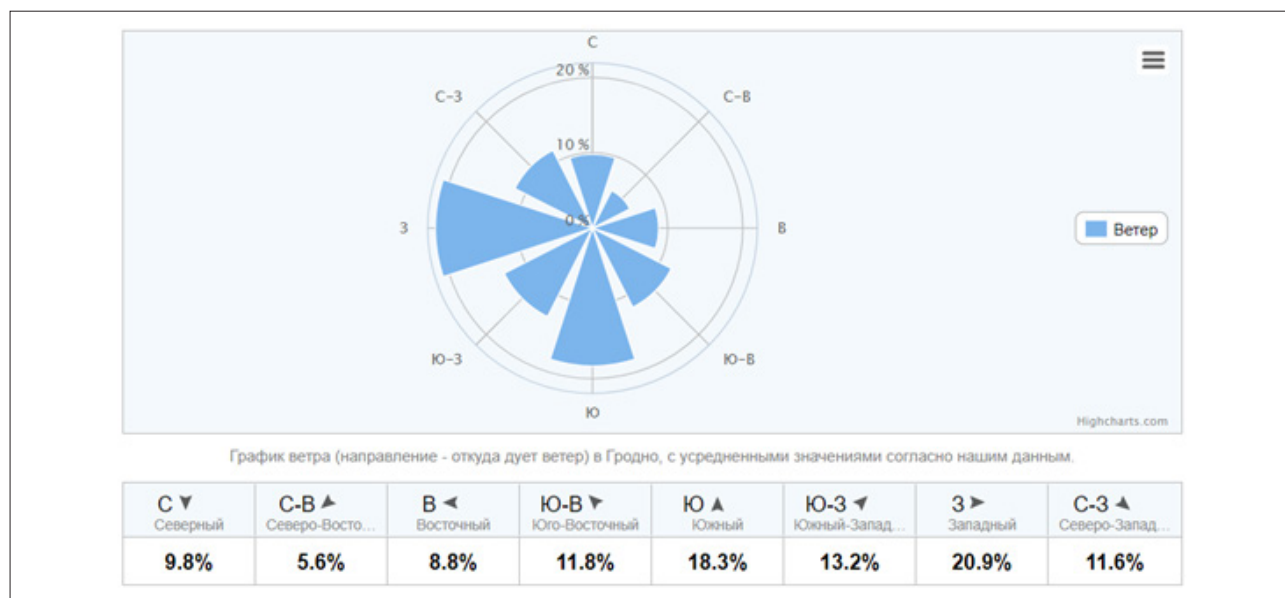


Рисунок 1. Процентное распределение ветров по направлениям в г. Гродно

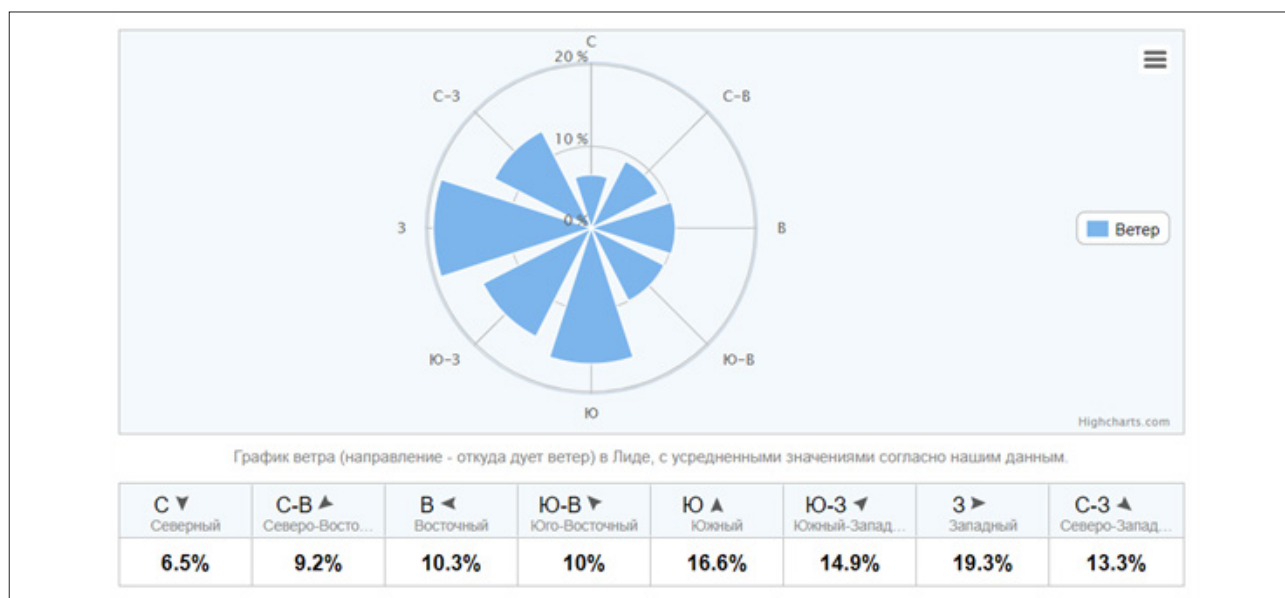


Рисунок 2. Процентное распределение ветров по направлениям в г. Лида

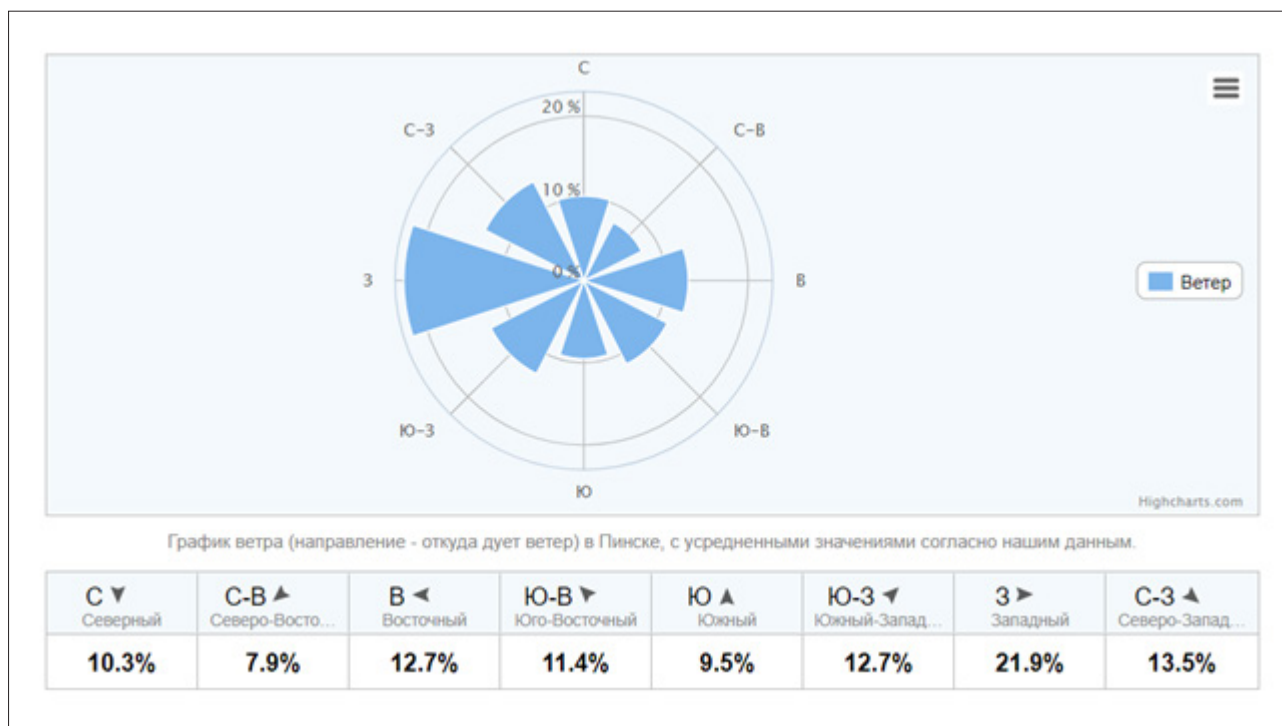


Рисунок 3. Процентное распределение ветров по направлениям в г. Пинске

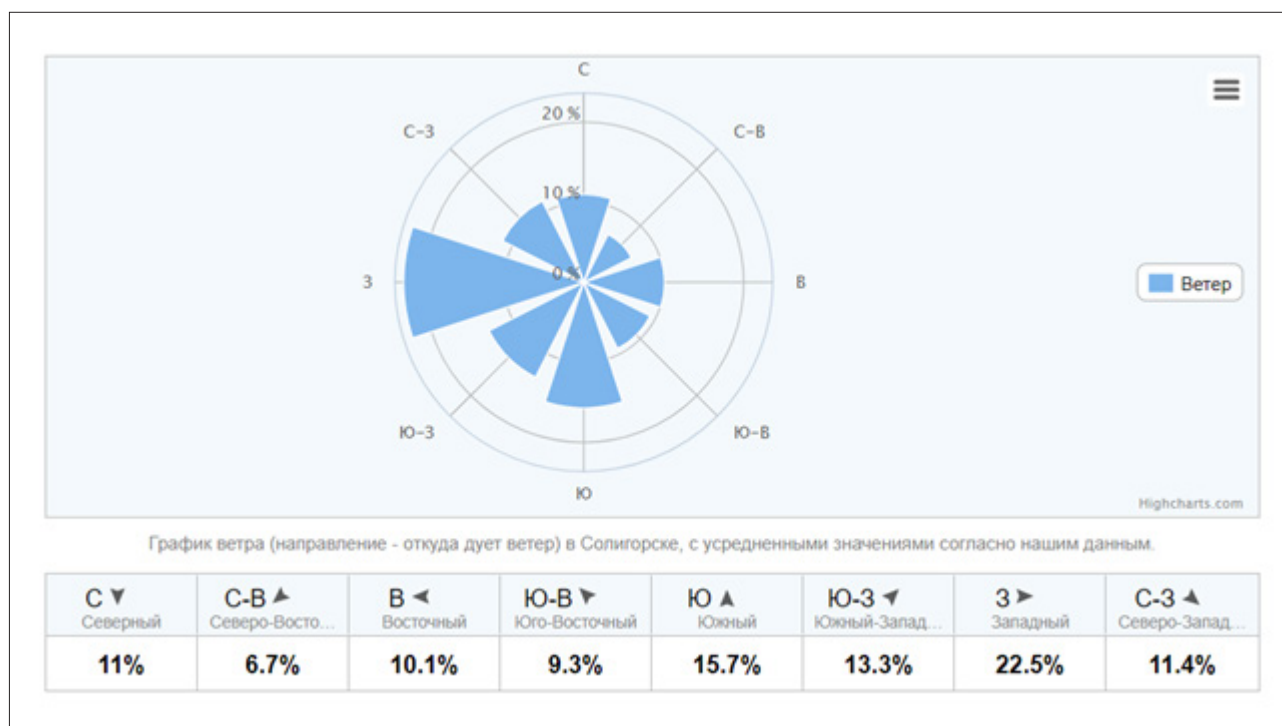


Рисунок 4. Процентное распределение ветров по направлениям в г. Солигорске

Таким образом процентное распределение ветров по направлениям

- Гродно: Юго-Запад (11.8 %), Запад (20.9 %)
- Лида: Юго-Восток (10 %), Запад (19.3 %)
- Пинск: Восток (12.7 %), Юго-Восток (11.4 %)
- Солигорск: Юг (9.3 %), Запад (22.5 %)

В Гродно доминируют западные и юго-западные ветры (20.9 % и 11.8 % соответственно), что диктует установку датчиков с подветренной стороны крупных магистралей.

Наиболее опасным с точки зрения экологии признаны западные ветры во всех исследуемых горо-

дах (средняя повторяемость выше 20 %), что требует смещения датчиков к востоку от главных осевых магистралей (ул. Данилова в Гродно, ул. Свердлова в Лиде).

Рейтинговая методика привязки экологического оборудования

Разработка схем установки газоанализаторов требует учета социально-демографических факторов. Мы использовали балльную систему (от 1 до максимального числа локаций).

Методическая формула приоритетности (P): $P = (N_{prop} + S_{obj} + V_{em}) \times K_{wind}$, где N_{prop} – рейтинг численности населения; S_{obj} – рейтинг социальных объектов (детские сады, школы, поликлиники); V_{em} – рейтинг объема выбросов ЗВ по данным экологических карт; K_{wind} – корректирующий коэффициент розы ветров (принят равным 2.0). Применение коэффициента «2» для метеорологических данных позволило сместить приоритет локаций к тем узлам, где транспортный выброс максимально эффективно переносится в селитебную зону, создавая риск для здоровья населения.

Результаты нахождения оптимального числа узлов наблюдения показывают, что предложенный алгоритм позволяет «закрыть» потребности в мониторинге города всего 32 точками контроля на четыре региона. Сравнение рейтинговых баллов для Гродно показывает, что узлы с максимальной суммой баллов (от 51 до 10) распределены неравномерно.

Установлено, что погрешность вычислений в 20 авт/час является «точкой перегиба» графика эффективности – дальнейшее снижение порога требует экспоненциального роста количества сенсоров (в Лиде – с 25 до 39, в Гродно – с 26 до 87). Это подтверждает экономическую обоснованность выбранной конфигурации сети мониторинга.

Разработка схем установки, выполненная на первом этапе, создает математические предпосылки для «символьного решения» – прогноза экологического фона на улицах, где физическая установка сенсоров невозможна из-за технических ограничений или высокой стоимости. Подобные расчетные сетки являются необходимым шагом к автоматизированному управлению светофорными объектами по экологическому критерию.

Предложенная динамическая модель управления позволяет трансформировать разрозненную информацию в структурированную систему принятия решений. В Гродно и Пинске выявлено, что 8 датчиков на город (при общем количестве наблюдаемых узлов от 15 до 65) позволяют реконструировать экологическую карту всей транспортной сети с погрешностью не более 10–15 %.

Особое значение имеет выявленная корреляция между типами загрязняющих веществ. Мониторинг

твердых частиц (PM) требует размещения сенсоров в зонах торможения и разгона (у перекрестков), в то время как оксиды азота (NO_x) более репрезентативны на скоростных перегонах. Наша методика учитывает этот «дуализм» трафика через распределение 8 приборов разного типа функционала.

Заключение

Проведенное исследование выявило, что базовый алгоритм является надежной инженерной базой для статистического учета, однако предложенный авторский алгоритм D-ISEM более пригоден для систем динамического управления, так как учитывает стохастическую природу воздушных потоков и структурную сложность транспортного графа современных белорусских городов.

Впервые реализован алгоритм SLP для нужд экологического мониторинга средних промышленных центров страны.

В рамках выполненной работы разработаны и теоретически обоснованы схемы размещения сенсорных сетей транспортного и экологического мониторинга для Гродно, Лиды, Пинска и Солигорска.

Разработана и апробирована рейтинговая методика привязки экологического оборудования, использующая метеорологический коэффициент коррекции.

Доказано, что использование алгоритма SLP в сочетании с метеорологическим коэффициентом позволяет сократить количество точек контроля на 45–60 % без потери информативности для транспортного планирования.

Установлены 32 локации для программируемых датчиков и 32 – для датчиков химического анализа, которые станут физическим носителем динамической модели управления качеством атмосферного воздуха. Таким образом определено оптимальное число точек автоматического мониторинга на исследуемый регион, что обеспечивает высокую экономическую эффективность проекта.

В рамках следующих исследований планируется реализация символьных математических решений (Interpolation of Pollutants) для покрытия всей городской застройки. Перспективным направлением является использование нейронных сетей типа LSTM (Long Short-Term Memory) для долгосрочного прогнозирования «дыхания» города на основе исторических данных за 5–10 лет. Также актуальным представляется исследование влияния автономного и электротранспорта на перераспределение весовых коэффициентов в алгоритмах SLP в условиях Республики Беларусь. Будет осуществлено решение задач оценки транспортных потоков в «темных» зонах сети, где установка физического датчика экономически нецелесообразна.

ЛИТЕРАТУРА

1. Капский, Д. В. Методология оценки воздействия изменения климата, уязвимости и климатических рисков в транспортной системе Республики Беларусь / Д. В. Капский, С. В. Богданович, Ю. В. Буртыль. Минск : БНТУ, 2022. 256 с. URL: <https://rep.bntu.by/handle/data/112369> (дата обращения: 27.04.2026).

2. Врубель, Ю. А. Определение потерь в дорожном движении / Ю. А. Врубель, Д. В. Капский, Е. Н. Кот. Минск : Белорусский национальный технический университет, 2006. 239 с. URL: <https://rep.bntu.by/handle/data/106833> (дата обращения: 27.04.2026).
3. Устойчивая городская мобильность: теория и практика развития / А. О. Лобашов, Е. Н. Кот, Д. В. Капский [и др.]. Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. 236 с.
4. Оценка воздействия изменения климата и климатических рисков в транспортных системах / Д. В. Капский, Н. А. Филиппова, Ю. В. Трофименко [и др.]. Москва : Техполиграфцентр, 2023. 248 с.
5. Капский, Д. В. Экологические потери в дорожном движении / Д. В. Капский // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2014. № 3(63). С. 163–167. URL: <https://izdat.istu.ru/index.php/vestnik/article/view/2995> (дата обращения: 27.04.2026).
6. Капский, Д. В. Выбросы вредных веществ транспорта в симбиотическом городе и прогноз сокращения выбросов CO₂ в изменяемой транспортной системе / Д. В. Капский, Д. В. Мозалевский, И. Г. Гамульский // Проектирование автомобильных дорог : сборник докладов 80-й Международной научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ, Москва, 24–28 января 2022 г. Москва, 2022. С. 244–253.
7. Капский, Д. В. Методики и модели оценки экологического воздействия автомобильного транспорта на экосистему симбиотического города / Д. В. Капский, О. В. Базаревич // Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития. 2022. № 3(70). С. 103–112. DOI: 10.52897/2411-4588-2022-3-103-112.
8. Базаревич, О. В. Использование GPS-данных для расчета экологического воздействия дорожного транспорта на экосистему симбиотических мегаполисов / О. В. Базаревич, Д. В. Капский // Системный анализ и прикладная информатика. 2022. № 4. С. 4–15. DOI: 10.21122/2309-4923-2022-4-4-15.
9. Капский, Д. В. Определение экологических потерь в населенном пункте от движения транспортных средств / Д. В. Капский, П. А. Пегин, С. А. Евтюков // Вода и экология: проблемы и решения. 2017. № 3(71). С. 147–157. DOI: 10.23968/2305–3488.2017.21.3.146–157.
10. Эффективность транспортной системы симбиотического города / Д. В. Капский, В. Н. Кузьменко, Д. В. Мозалевский [и др.] // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XI Международной научно-практической конференции, Гомель, 25–26 ноября 2021 года : в 2 ч. / редкол.: Ю. И. Кулаженко (гл. ред.) и [др.]. Гомель, 2021. Ч. 2. С. 76–77. URL: <http://elib.bsut.by/bitstream/handle/handle/123456789/6430> (дата обращения: 27.04.2026).
11. Развитие городского транспорта в городах Полоцке и Новополоцке / Д. В. Капский, А. К. Головнич, Т. В. Вигерина [др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. 2020. № 11. С. 85–97. URL: <https://journals.psu.by/industry/article/view/567> (дата обращения: 27.04.2026).
12. Оценка состояния транспортной системы городов Полоцка и Новополоцка / Д. В. Капский, В. П. Иванов, А. К. Головнич [др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. 2020. № 11. С. 98–102. URL: <https://journals.psu.by/industry/article/view/568> (дата обращения: 27.04.2026).
13. Guideline for air quality data collection : management approaches for clean mobility : D.T2.2.8 // Interreg Central Europe : Dynaxibility4CE. Final version 02 2022. URL: <https://programme2014-20.interreg-central.eu/Content.Node/Dynaxibility4CE/D.T2.2.8-arpae-final-version.pdf> (дата обращения: 27.04.2026).
14. Mobile monitoring of air pollution – a position paper on use cases, good practices, challenges, and opportunities / J. Kerckhoffs, J. Hofman, J. Khan [et al.] // Environment International. 2025. Vol. 202. 109582. DOI: 10.1016/j.envint.2025.109582.
15. Air quality monitoring in coal-centric cities: a hybrid approach / S. Mora, P. deSouza, F. Duarte [et al.] // Sustainability. 2023. Vol. 15, № 16. 12624. DOI: 10.3390/su151612624.
16. Big mobility data reveals hyperlocal air pollution exposure disparities in the Bronx, New York / I. Testi, A. Wang, S. Paul [et al.] // Nature Cities. 2024. №1. С. 512–521. DOI: 10.1038/s44284-024-00093-x.
17. Air quality monitoring using mobile low-cost sensors mounted on trash-trucks: methods development and lessons learned / P. DeSouza, A. Anjomshoa, F. Duarte [et al.] // Sustainable Cities and Society. 2020. Vol. 60. 102239. DOI: 10.1016/j.scs.2020.102239.
18. Air pollution and greenspace exposure disparities revealed by hyperlocal exposure metrics across European cities / M. E. S. Sabedotti, F. Duarte, P. Koutrakis [et al.] // Communications Sustainability. 2026. Vol. 1, № 48. P. 1–14. DOI: 10.1038/s44458-026-00046-6.

REFERENCES

1. Kapski D.V., Bogdanovich S.V., Burtyl' Ju.V. *Metodologija ocenki vozdeystviya izmenenija klimata, uязvimo-sti i klimaticheskikh riskov v transportnoj sisteme Respubliki Belarus' [Methodology for Assessing the Impact of Climate Change, Vulnerability and Climate Risks in the Transport System of the Republic of Belarus]*. Minsk: BNTU; 2022. 256 p. (in Russian). Available at: <https://rep.bntu.by/handle/data/112369> (accessed 27 April 2026).
2. Vrubel' Ju.A., Kapski D.V., Kot E.N. *Opredelenie poter' v dorozhnom dvizhenii [Determination of Traffic*

Losses]. Minsk: BNTU; 2006. 239 p. (in Russian). Available at: <https://rep.bntu.by/handle/data/106833> (accessed 27 April 2026).

3. Lobashov A.O., Kot E.N., Kapski D.V., Larin O.N., Bogdanovich S.V., Semchenko S.S. *Ustojchivaya gorodskaya mobil'nost': teoriya i praktika razvitiya [Sustainable Urban Mobility: Theory and Practice of Development]* Vologda: Infra-Inzhenerija; 2023. 236 p. (in Russian).

4. Kapski D.V., Filippova N.A., Trofimenko Ju.V., et al. *Ocenka vozdeystviya izmenenija klimata i klimaticheskikh riskov v transportnykh sistemakh [Assessing the Impacts of Climate Change and Climate Risks in Transport Systems]*. Moscow: Tehpoligrafcentr; 2023. 248 p. (in Russian).

5. Kapski D.V. Ekologicheskie poteri v dorozhnom dvizhenii [Environmental losses in road traffic]. *Vestnik Izhevtu imeni M. T. Kalashnikova [Vestnik of Kalashnikov Izhevsk State Technical University]*. 2014;3(63):163–167 (in Russian). Available at: <https://izdat.istu.ru/index.php/vestnik/article/view/2995> (accessed 27 April 2026).

6. Kapski D.V., Mozalevskij D.V., Gamulskij I.G. Vybrosy vrednykh veshchestv transporta v simbioticheskom gorode i prognoz sokrashcheniya vybrosov CO₂ v izmenyaemoj transportnoj sisteme [Emissions of harmful substances of transport in a symbiotic city and forecast of CO₂ emission reduction in a modified transport system]. *Proektirovanie avtomobil'nykh dorog : sbornik dokladov 80-j Mezhdunarodnoj nauchno-metodicheskoy i nauchno-issledovatel'skoj konferencii MADI [Designing Highways: Collection of Reports of the 80th International Scientific, Methodological and Research Conference of MADI]*, Moscow, January 24–28, 2022. Moscow; 2022. pp 244–253 (in Russian).

7. Kapski D.V., Bazarevich O.V. Methods and models for assessing the environmental impact of road transport on the ecosystem of a symbiotic city. *Ehkonomika Severo-Zapada: problemy i perspektivy razvitiya [Economy of the North-West: Problems and Prospects for Development]*. 2022;3(70):103–112 (in Russian). <https://doi.org/10.52897/2411-4588-2022-3-103-112>.

8. Bazarevich O.V., Kapski D.V. Using GPS data to calculate the ecological impact of road transport on the ecosystem of symbiotic megacities. *System Analysis and Applied Information Science*. 2022;(4):4–15 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2022-4-4-15>.

9. Kapskiy D.V., Pegin P.A., Evtyukov S.A. Definition of ecological losses in the city from the movement of vehicles. *Voda i ehkologiya: problemy i resheniya [Water and Ecology: Problems and Solutions]*. 2017;(71):147–157 (in Russian). <https://doi.org/10.23968/2305-3488.2017.21.3.147-158>.

10. Kapski D.V., Kuzmenko V.N., D. V. Mozalevskij D.V., Krasilnikova A.S., Karaseva M.G. Effektivnost' transportnoj sistemy simbioticheskogo goroda [Efficiency of the transport system of the symbiotic city]. *Problemy bezopasnosti na transporte : materialy XI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii [Problems of Transport Safety: Materials of the XI International Scientific and Practical Conference]*, Gomel, November 25–26, 2021. Volume 2. Gomel; 2021. pp. 76–77 (in Russian). Available at: <http://elib.bsut.by/bitstream/handle/handle/123456789/6430> (accessed 27 April 2026).

11. Kapskiy D., Golovnich A., Vigerina T., Kuzmenko V., Krasilnikova A., Gorelik Ye, et al. Development of urban transport in the cities of Polotsk and Novopolotsk. *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B. Promyshlennost'. Prikladnye nauki [Vestnik of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Sciences]*. 2020;11:85–97 (in Russian). Available at: <https://journals.psu.by/industry/article/view/567> (accessed 27 April 2026).

12. Kapskiy D., Ivanov V., Golovnich A., Kuzmenko V., Krasilnikova A., Gorelik Ye., et al. Assessment of the condition of the transport system of the cities of Polotsk and Novopolotsk. *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B. Promyshlennost'. Prikladnye nauki [Vestnik of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Sciences]*. 2020;11:98–102 (in Russian). Available at: <https://journals.psu.by/industry/article/view/568> (accessed 27 April 2026).

13. Guideline for air quality data collection: Management approaches for clean mobility (D.T2.2.8). *Interreg Central Europe: Dynaxibility4CE*; 2022 Feb. Available at: <https://programme2014-20.interreg-central.eu/Content.Node/Dynaxibility4CE/D.T2.2.8-arpae-final-version.pdf> (accessed 27 April 2026).

14. Kerckhoffs J., Hofman J., Khan J., Adams M.D., Blanco M.N., deSouza P., et al. Mobile monitoring of air pollution – a position paper on use cases, good practices, challenges, and opportunities. *Environment International*. 2025;202:109582. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2025.109582>.

15. Mora S., deSouza P., Duarte F., Wang A., Paul S., Berrones A., et al. Air quality monitoring in coal-centric cities: A hybrid approach. *Sustainability*. 2023;15(16):12624. <https://doi.org/10.3390/su151612624>.

16. Testi I., Wang A., Paul S., Mora S., Walker E., Marguerite N., et al. Big mobility data reveals hyperlocal air pollution exposure disparities in the Bronx, New York. *Nature Cities*. 2024;1:512–521. <https://doi.org/10.1038/s44284-024-00093-x>.

17. DeSouza P., Anjomshoa A., Duarte F., Kahn R., Kumar P., Ratti. Air quality monitoring using mobile low-cost sensors mounted on trash-trucks: Methods development and lessons learned. *Sustainable Cities and Society*. 2020;60:102239. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102239>.

18. Sabedotti M.E.S., Duarte F., Koutrakis P., Santi P., Ratti C., Nyhan M.M. Air pollution and greenspace exposure disparities revealed by hyperlocal exposure metrics across European cities. *Communications Sustainability*. 2026;1:48. <https://doi.org/10.1038/s44458-026-00046-6>.

D. V. KAPSKI, A. V. KORZHOVA

METHODOLOGY OF FORMING DYNAMIC AIR QUALITY MONITORING MODELS IN URBAN AREAS BASED ON TRAFFIC SENSOR NETWORK OPTIMIZATION ALGORITHMS

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. This scientific article presents a comprehensive theoretical and applied study dedicated to the optimization of atmospheric air monitoring systems in modern cities with populations over 100,000. The relevance of this study stems from the need to transition from traditional passive static monitoring methods to dynamic adaptive models of environmental quality management, a key element of the "smart" and "symbiotic" city concept for minimizing environmental risks. Four major industrial and administrative centers of the Republic of Belarus – Grodno, Pinsk, Lida, and Soligorsk – were selected as the research sites. The scientific novelty of this study lies in the development of an integrated approach combining a mathematical solution to the optimal sensor placement problem (SLP) with a multivariate graphical analysis of anthropogenic impact. A detailed methodology is provided for conducting 20,000 iteration cycles for each transport scheme, which made it possible to identify critical nodes in urban framework networks where the concentration of sensors provides minimal error in calculating transport and environmental parameters. Particular attention is paid to the interdisciplinary consideration of meteorological factors, in particular, the use of a weighting factor for wind rose indicators when prioritizing gas analyzer installation locations. The article systematizes data on traffic load, the hierarchy of street and road networks, and the density of social facilities in the studied cities. Implementation of the proposed model (based on 32 automated posts) allows for the generation of symbolic solutions for assessing the environmental situation in unmonitored network sections. The study's results form the basis for the development of predictive emission management systems capable of adjusting traffic management in real time to prevent exceeding maximum permissible pollutant concentrations. The conclusion outlines promising areas for integrating the resulting models with machine learning and artificial intelligence algorithms within the framework of long-term sustainable urban development programs.

Keywords: transport ecology, air quality, pollutants, mathematical modeling, SLP algorithm, wind rose, rating assessment, intelligent transport systems (ITS), symbiotic city



Капский Денис Васильевич

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь.
Доктор технических наук, профессор. Профессор кафедры «Транспортные системы и технологии».

Высшая аттестационная комиссия (ВАК) Республики Беларусь, заместитель Председателя ВАК.

Проводит исследования в области организации движения, технических средств регулирования и информационно-алгоритмического обеспечения управления движением, транспортного планирования и математического моделирования процессов транспортных систем.

Denis V. Kapski

Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus.

Doctor of Science (Engineering), Professor. Professor of the Department of Transport Systems and Technologies.

Vice-chairman of the Higher Attestation Commission (HAC) of the Republic of Belarus.

Conducts research in the field of traffic management, technical means of regulation and information and algorithmic support for traffic control, transport planning and mathematical modeling of transport systems processes.

E-mail: d.kapsky@bntu.by



Коржова Антонина Владимировна

Филиал Белорусского национального технического университета «Научно-исследовательский политехнический институт», г. Минск, Республика Беларусь.

Магистр технических наук, заведующая сектором дорожного движения НИИЦТС. Проводит исследования в области организации движения и технических средств регулирования.

Antonina V. Korzhova

Research Polytechnic Institute (Belarusian National Technical University branch), Minsk, Republic of Belarus.

Master of Engineering. Head of the Traffic Sector at the Research and Testing Center for Vehicles. Conducts research in the field of traffic organization and technical control means.

E-mail: nicdd@bntu.by