

Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

УДК 004.942:504.3.054

**РЯБЫЧИНА**  
**Ольга Петровна**

**СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ВЫБОРЕ  
ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТА ДВИЖЕНИЯ ПЕШЕХОДОВ В ГОРОДЕ  
С УЧЕТОМ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук  
по специальности  
05.13.01 – системный анализ, управление и обработка информации

Минск 2021

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусская государственная академия связи».

Научный руководитель: **РЫБАК Виктор Александрович**,  
кандидат технических наук, доцент, проректор  
по учебной работе учреждения образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты: **СТАРОВОЙТОВ Валерий Васильевич**,  
доктор технических наук, профессор, главный  
научный сотрудник государственного научного  
учреждения «Объединенный институт проблем  
информатики Национальной академии наук  
Беларуси»;

**НАРКЕВИЧ Иван Петрович**,  
доктор технических наук, доцент, профессор  
кафедры экологического мониторинга и  
менеджмента Международного  
государственного экологического института  
имени А. Д. Сахарова Белорусского  
государственного университета

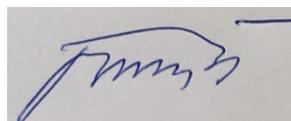
Оппонирующая организация: Белорусский национальный технический  
университет

Защита состоится «20» мая 2021 г. в 14.00 на заседании совета по защите  
диссертаций Д 02.15.01 при учреждении образования «Белорусский  
государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу:  
220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, тел. 293-89-89, e-mail:  
dissovet@bsuir.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан «    » апреля 2021 г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций Д 02.15.01,  
кандидат технических наук, доцент



М. П. Ревотюк

## ВВЕДЕНИЕ

Одна из наиболее острых экологических проблем современности – качество атмосферного воздуха в городах многих стран, в том числе и в Республике Беларусь. Выбросы промышленности, энергетики и транспорта оказывают негативное воздействие на состояние атмосферного воздуха городов, на здоровье населения и на окружающую среду в целом.

В настоящее время в городах Республики Беларусь ведется мониторинг атмосферного воздуха стационарными станциями, однако их количество измеряется единицами, а информация собирается в пакетном режиме.

Вместе с тем в рамках Национальной стратегии устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2030 г., Орхусской конвенции и Типовой концепции развития «умных городов» в Республике Беларусь требуется дальнейшее развитие подсистемы мониторинга атмосферного воздуха и создание соответствующих систем поддержки принятия решений. Подобные системы представляют научный и практический интерес, так как могут быть использованы для решения важных практических задач, начиная от выбора оптимального маршрута для пешей или велосипедной прогулки в городе и заканчивая действиями в условиях чрезвычайных ситуаций.

Существующие методы мониторинга атмосферного воздуха и математического моделирования и обработки результатов мониторинга не обеспечивают требуемую оперативность и точность получения информации о состоянии атмосферного воздуха в заданной точке города или на маршруте передвижения по городу. Отсутствуют математические модели и методы решения задач определения точек города, в которых следует брать пробы воздуха, поиска оптимальных маршрутов движения беспилотного летательного аппарата или передвижной лаборатории для взятия проб воздуха, интегральной оценки влияния на здоровье человека состояния воздуха в заданной точке города или на маршруте передвижения по городу. Таким образом, существует научно-техническая проблема: с одной стороны, есть необходимость в предоставлении оперативных данных о загрязнении атмосферного воздуха населению, которое в соответствии с международными конвенциями имеет право получать подобные данные, с другой – нет соответствующих систем и нормативного регулирования.

В диссертационной работе поставлены и решены задачи предоставления через сеть Интернет в режиме реального времени информации о текущем состоянии атмосферного воздуха в заданной точке города, на планируемом маршруте передвижения, а также формирования и выдачи рекомендаций по изменению маршрута с целью минимизации времени нахождения в местах с повышенным содержанием загрязняющих веществ в атмосферном воздухе.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с научными программами (проектами), темами**

Тема диссертации соответствует: п. 5 «Информатика и космические исследования» и п. 10 «Экология и природопользование» приоритетных направлений научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 гг., утвержденных постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 12.03.2015 № 190; п. 1 «Цифровые информационно-коммуникационные и междисциплинарные технологии, основанные на них производства: развитие информационного общества, электронного государства и цифровой экономики; математика и моделирование сложных функциональных систем (технологических, биологических, социальных); технологии “умного” города» приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 гг., утвержденных Указом Президента Республики Беларусь от 07.05.2020 № 156; утвержденным планам работы научно-исследовательской лаборатории «Разработка теории, программных средств и технологий программирования сетей телекоммуникаций» учреждения образования «Белорусская государственная академия связи» на 2016–2020 гг.

### **Цель и задачи исследования**

Цель диссертационной работы – разработка и апробация системы поддержки принятия решений при выборе оптимального безопасного маршрута движения пешеходов в городе с учетом загрязнения воздуха.

Для достижения поставленной цели в диссертации решены следующие задачи:

- проведен анализ существующих аппаратных и программных методов и средств мониторинга загрязнения атмосферного воздуха, обоснован выбор датчиков для контроля его качества;
- разработан интегральный показатель загрязнения атмосферного воздуха, основанный на данных от выбранных датчиков в режиме реального времени;
- разработан аппаратно-программный комплекс для мониторинга загрязнения атмосферного воздуха;
- разработан алгоритм поиска оптимального маршрута движения пешеходов с учетом уровня загрязнения атмосферного воздуха по пути следования;
- разработан алгоритм прогнозирования и визуализации качества атмосферного воздуха с учетом направления и скорости ветра;
- разработаны алгоритмы поиска оптимальных маршрутов движения беспилотного летательного аппарата (БЛА) и передвижной лаборатории для взятия проб воздуха в заданных точках города для актуализации данных об уровне загрязнения воздуха;

– апробированы элементы разработанной системы поддержки принятия решений (СППР) при выборе оптимального маршрута движения пешеходов с учетом загрязнения воздуха и оценен социально-экономический эффект от ее использования.

### **Научная новизна**

1. Предложен модифицированный алгоритм поиска оптимального маршрута следования пешеходов, использующий эвристическую оценочную функцию вида «расстояние и нанесенный вред», что позволяет, в отличие от известных методов, использующих оценочную функцию на основе единственного критерия, учесть неблагоприятное воздействие загрязнения атмосферного воздуха с учетом времени нахождения в пути.

2. Предложен алгоритм прогнозирования и визуализации уровня загрязнения атмосферного воздуха для составления актуальных карт, в основе которого лежит модифицированная методика расчета концентраций вредных веществ в атмосферном воздухе (ОНД-86), отличающийся от существующих методов учетом направления и скорости ветра, позволяющий дифференцировать территорию по ожидаемой степени загрязнения и повысить актуальность составления карт.

3. Разработаны математические модели и алгоритмы поиска оптимальных маршрутов движения БЛА или передвижной лаборатории для взятия проб воздуха в точках города, отличающиеся использованием при определении точек коэффициента актуальности наблюдений, динамического изменения направления и скорости ветра, а также времени, прошедшего от предыдущего обновления данных.

4. Разработаны и реализованы структура системы поддержки принятия решений при выборе маршрутов движения пешеходов с учетом динамики экологической обстановки и ее аппаратно-программный комплекс, не имеющий аналогов в Республике Беларусь и предоставляющий более полный набор функциональных сервисов в сравнении с существующими интернет-службами.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Алгоритм поиска оптимального маршрута движения пешеходов в городе, отличающийся использованием нового интегрального показателя загрязнения атмосферного воздуха, позволяющий находить лучший маршрут с точки зрения неблагоприятного воздействия на здоровье человека.

2. Алгоритм прогнозирования уровня загрязнения атмосферного воздуха для составления актуальных карт на основе модифицированной методики расчета концентраций вредных веществ в атмосферном воздухе (ОНД-86), отличающийся от существующих методов учетом динамического изменения метеопараметров и используемых расчетных соотношений для получения прогнозных значений, что позволяет повысить точность прогнозов на 25–30 % в сравнении с результатами,

получаемыми с использованием известных геоинформационных систем (ГИС) MapInfo и ArcView.

3. Алгоритм поиска оптимального маршрута движения БЛА для актуализации данных об уровне загрязнения атмосферного воздуха на основе модифицированной задачи коммивояжера, отличающийся выбором количества точек, учетом динамики изменений направления и скорости ветра, а также времени, прошедшего от предыдущего обновления, что позволяет сократить длину маршрута более чем в три раза по сравнению с маршрутом, полученным методом ближайшей непосещенной вершины для ста вершин, и время актуализации данных за счет исключения части точек взятия проб воздуха.

4. Система поддержки принятия решений при выборе оптимального маршрута движения пешеходов с учетом степени загрязнения воздуха и степени опасности загрязняющих веществ, включающая аппаратно-программный комплекс, специальное математическое и программное обеспечение обработки и визуализации экологических данных, позволяющая снизить неблагоприятное воздействие на здоровье населения.

#### **Личный вклад соискателя ученой степени**

Диссертация является самостоятельным исследованием. Автором научно обоснованы алгоритмы поиска оптимального пути следования, прогнозирования качества атмосферного воздуха, поиска оптимального маршрута движения БЛА и передвижной лаборатории, проведены эксперименты, оценена эффективность СППР и проанализированы полученные результаты. Все выводы и защищаемые положения получены автором самостоятельно. Определение целей и задач исследований, интерпретация и обобщение полученных результатов проводились совместно с научным руководителем В. А. Рыбаком.

#### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях: XXII, XXIII, XXV Международных научно-технических конференциях «Современные средства связи» (Минск, 2017, 2018, 2020); XVII, XVIII, XIX научно-технических конференциях студентов и молодых специалистов Белорусской государственной академии связи (Минск, 2017–2019); Международной научно-технической конференции «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (Могилев, 2018); 55-й, 56-й Научно-технических конференциях аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (Минск, 2019–2020); X Международной научно-технической конференции «Информационные технологии в промышленности, логистике и социальной сфере» ITI\*2019 (Минск, 2019); VI Международной заочной научно-практической конференции, посвященной Всемирному дню

охраны окружающей среды «Проблемы экологии и экологической безопасности» (Минск, 2019).

Результаты диссертационной работы внедрены на предприятиях ООО «Завод «Аэроэнергопром», СП ЗАО «Юнисон», в учебный процесс учреждения образования «Белорусская государственная академия связи» при изучении дисциплины «Системы управления базами данных».

### **Опубликование результатов диссертации**

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 30 научных изданиях, в том числе 10 статей в научных рецензируемых журналах, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, 2 статьи в зарубежных рецензируемых изданиях (общим объемом 3,64 авторского листа), 18 статей в сборниках и материалах конференций. Получены 3 патента на полезную модель и подана заявка на патент на изобретение Республики Беларусь.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из перечня сокращений и условных обозначений, введения, общей характеристики работы, четырех глав с выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и семи приложений.

Общий объем диссертации составляет 168 страниц, из них 90 страниц основного текста, 39 рисунков на 11 страницах, 35 таблиц на 12 страницах, библиографический список (110 наименований на 9 страницах), список публикаций автора по теме диссертации (34 наименования на 5 страницах), 7 приложений на 39 страницах.

## **ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы.

В **первой главе** проведен аналитический обзор литературы, который показал, что в настоящее время в Республике Беларусь нет возможности получать данные о загрязнении воздуха в оперативном режиме. Установлено, что существующая система мониторинга атмосферного воздуха в городах не может обеспечить полноту и достоверность исходных данных для решения задачи поиска оптимального маршрута движения в городе по критерию минимизации неблагоприятного воздействия загрязнения атмосферного воздуха. Выполнен анализ показателей загрязнения атмосферного воздуха, технических и программных средства мониторинга, алгоритмов прогнозирования загрязнения атмосферного воздуха, алгоритмов поиска оптимального маршрута и СППР. Проведенный анализ выявил невозможность применения существующих алгоритмов и средств для решения поставленных задач.

Во **второй главе** разработано математическое и алгоритмическое обеспечение СППР при выборе оптимального маршрута движения пешеходов в городе с учетом загрязнения воздуха.

В СППР, учитывающей степень загрязнения атмосферного воздуха в городе, требуется оценивать степень загрязнения воздуха на любом маршруте движения. Для определения количества загрязняющих веществ в атмосферном воздухе на каждом перекрестке используются математические методы интерполяции по формуле кригинга. В этой формуле количество загрязняющих веществ в заданной точке вычисляется на основе известного количества загрязняющих веществ в нескольких ближайших точках, в которых были взяты пробы воздуха. Для оценки качества интерполяции применяется метод кросс-валидации. Вычисление степени загрязнения воздуха в произвольной точке города может осложняться тем, что в окрестности точки требуемого радиуса может не оказаться пунктов наблюдения за состоянием воздуха, либо количество таких пунктов будет недостаточным для достижения требуемой точности расчетов. В этом случае требуется дополнительно взять пробы атмосферного воздуха на перекрестках с помощью БЛА или передвижной лаборатории.

Построены непрерывная и дискретная математические модели задачи определения перекрестков, которые будут выступать дополнительными точками взятия проб атмосферного воздуха. В непрерывной модели задача сводится к поиску оптимального покрытия многоугольника на плоскости кругами заданного радиуса. В дискретной математической модели задачи город представляется в виде полного неориентированного графа  $G(P, D)$ , множество вершин которого  $P = \{P_i, i = \overline{1, p}\}$  состоит из множества стационарных пунктов взятия проб воздуха  $N$  и множества всех перекрестков города, не входящих в множество  $N$ . Будем считать, что первые  $n$  вершин графа – это точки из  $N$ , а следующие  $(p - n)$  вершин – это перекрестки города. Каждому ребру графа, соединяющему вершины  $P_i$  и  $P_j$ , поставим в соответствие величину  $d_{ij}$  – расстояние между соответствующими точками города по прямой линии. С каждой вершиной графа свяжем переменную  $z_i \in \{0, 1\}$ , значение которой равно 1, если в соответствующей точке города берутся пробы воздуха, и равно 0 в противном случае. Из определения графа  $G$  следует, что  $z_i = 1$  для всех  $i = \overline{1, n}$ . Для каждой вершины графа  $P_i$  вычислим метку вершины  $m_i$  по правилу: если  $z_i = 1$ , то  $m_i = 0$ , иначе  $m_i = \min\{d_{ij} \mid j = \overline{1, p}, j \neq i, z_j = 1\}$ . Другими словами, метка перекрестка равна расстоянию от этого перекрестка до ближайшей точки взятия пробы воздуха. Задача поиска перекрестков, в которых надо взять дополнительные пробы воздуха, формулируется следующим образом: найти значения переменных  $z_i$  для  $i = \overline{n+1, p}$ , при которых достигается минимума сумма всех  $z_i$ ,  $i = \overline{1, p}$ , и выполняются условия  $m_i \leq r$  для всех  $i = \overline{1, p}$ . Для решения задачи предложен эвристический алгоритм,

построенный на принципах «жадных» алгоритмов решения задач дискретной оптимизации.

Предложены математические модели задач поиска оптимального маршрута полета БЛА и поиска оптимального маршрута проезда передвижной лаборатории по всем перекресткам, на которых требуется взять пробы воздуха. Первая задача сводится к известной задаче коммивояжера на графе, вторая – к задаче поиска в ориентированном графе цикла минимальной длины, проходящего через указанные вершины. В такой постановке задача в теории графов практически не рассматривалась. Поскольку количество вершин графа может измеряться несколькими тысячами, использовать точные методы решения задачи невозможно, поэтому предложен метод, сущность которого состоит в сведении этой задачи к задаче поиска оптимального маршрута облета БЛА всех перекрестков, в которых требуется взять пробы воздуха.

Для построения математической модели задачи поиска оптимального маршрута из одной точки города в другую рассмотрим граф  $S(P, U)$ , вершинами которого являются все перекрестки города. Через  $s$  обозначим количество вершин этого графа. Между вершинами с номерами  $i \in \overline{1, s}$  и  $j \in \overline{1, s}$  существует дуга, направленная от вершины с номером  $i$  к вершине с номером  $j$ , если между соответствующими перекрестками имеется отрезок улицы, по которой разрешено движение в данном направлении. Длина этого отрезка улицы записывается в матрицу  $U$  в качестве элемента  $u_{ij}$ . Если между вершинами отсутствует дуга, то  $u_{ij} = 0$ . С каждой вершиной графа  $S$  свяжем метку  $z_i \in \{0, 1\}$ ,  $i = \overline{1, s}$ , значение которой равно 1, если на соответствующем перекрестке города взята проба воздуха и результаты ее анализа хранятся в базе данных (БД), и равно 0 в противном случае.

Через  $k$  обозначим количество загрязняющих веществ, которые учитываются при оценке вреда организму. Создадим  $s \times k$  матрицу  $Q$ , элемент которой  $q_{ij}$ ,  $i = \overline{1, s}$ ,  $j = \overline{1, k}$ , равен количественной оценке содержания в воздухе на перекрестке с номером  $i$  загрязняющего вещества с номером  $j$ . Для тех  $q_{ij}$ , для которых  $z_i = 1$ , значения  $q_{ij}$  определяются в результате анализа проб воздуха. Значения остальных  $q_{ij}$  вычислим по интерполяционным формулам кригинга. Создадим  $s \times s$  матрицу  $V$ , элемент которой  $v_{ij}$ ,  $i = \overline{1, s}$ ,  $j = \overline{1, s}$ , равен количественной оценке вреда организму человека, наносимому за 1 час при нахождении его на отрезке улицы, идущем от перекрестка с номером  $i$  к перекрестку с номером  $j$ . Значение  $v_{ij}$  зависит от содержания всех загрязняющих веществ в воздухе на рассматриваемых перекрестках, которое записано в строках матрицы  $Q$  с номерами  $i$  и  $j$ . Значение  $v_{ij}$  вычисляется только для тех пар перекрестков, для которых в графе  $S(P, U)$  существует дуга, направленная от вершины с номером  $i$  к вершине с номером  $j$ . Значения остальных  $v_{ij}$  положим равными 0.

Рассмотрим граф  $S(P, V)$ , полученный из графа  $S(P, U)$  путем замены матрицы  $U$  на матрицу  $V$ . Каждая вершина этого графа соответствует перекрестку города, ненулевое значение элемента  $v_{ij}$ ,  $i = \overline{1, s}$ ,  $j = \overline{1, s}$ , указывает на наличие дуги от вершины с номером  $i$  к вершине с номером  $j$ . Весовой коэффициент дуги  $v_{ij}$  равен количественной оценке вреда организму человека, наносимому за 1 час нахождения на соответствующем отрезке улицы.

Все описанные вычисления для получения графа  $S(P, V)$  проводятся предварительно до решения задачи поиска оптимального маршрута из одной точки города в другую. Матрица  $V$  хранится в базе данных системы и пересчитывается каждый раз при получении результатов анализа новых проб атмосферного воздуха. Матрица пересчитывается также в случае аварийных ситуаций с обнаружением аварийных выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Входными данными для решения задачи поиска оптимального маршрута из одной точки города в другую являются координаты этих точек и скорость движения  $\mu$ . Если начальная или конечная точка маршрута не находятся на перекрестке, то в граф  $S(P, V)$  добавляются одна или две дополнительные вершины, соответствующие начальной и конечной точкам маршрута. Эти точки должны находиться на одной из улиц, имеющих выход хотя бы на один перекресток. Для каждой добавленной точки добавляется строка в матрицу  $Q$  и вычисляются значения элементов строки, а затем добавляются строка и столбец в матрицу  $V$  и вычисляются значения их элементов. Наконец, матрица  $V$  для проведения расчетов заменяется матрицей  $V'$ , каждый ненулевой элемент которой  $v'_{ij}$  вычисляется по правилу  $v'_{ij} = v_{ij} (u_{ij} / \mu)$ , где  $u_{ij}$  – длина отрезка улицы между вершинами с номерами  $i$  и  $j$ .

В рассмотренной математической модели задачи поиска оптимального маршрута из одной точки города в другую учитываются результаты анализа проб атмосферного воздуха, взятых в определенных точках города при известных значениях температуры и влажности воздуха. Для этих целей предложена формула для расчета интегрального показателя загрязнения атмосферного воздуха:

$$l = \frac{TV}{n} \sum_{i=1}^n k_{it} k_{iv} \frac{C_i}{C_i^{\max}}, \quad (1)$$

где  $n$  – число учитываемых загрязнителей;  $k_{it}$  – коэффициент, учитывающий изменение действия загрязняющего вещества при изменении температуры;  $k_{iv}$  – коэффициент, учитывающий изменение действия загрязняющего вещества при изменении влажности воздуха;  $C_i$  – разовая концентрация загрязняющего вещества в атмосферном воздухе в определенный момент времени, г/м<sup>3</sup>;  $T$  – температура, градусы Цельсия;  $V$  – влажность, г/м<sup>3</sup>;  $C_i^{\max}$  – максимально разовая

предельно допустимая концентрация загрязняющего вещества в атмосферном воздухе, г/м<sup>3</sup>.

В терминах введенных обозначений задача поиска оптимального маршрута из одной точки города в другую по критерию минимизации вреда организму от нахождения в зонах повышенного содержания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе сводится к известной задаче поиска кратчайшего маршрута в графе  $S(P, V')$  между вершинами, соответствующими начальной и конечной точкам маршрута. Для решения задачи используется модифицированный алгоритм Дейкстры, заключающийся в поиске оптимального безопасного маршрута следования пешеходов, использующий эвристическую оценочную функцию вида «расстояние и нанесенный вред», что позволяет, в отличие от известных методов, использующих оценочную функцию на основе единственного критерия, учесть неблагоприятное воздействие загрязнения атмосферного воздуха с учетом времени прохождения пути. Суть алгоритма: выбираются две точки, рассчитываются все возможные маршруты, вычисляются значения интегрального показателя на всех маршрутах, выбирается оптимальный безопасный маршрут (рисунок 1).

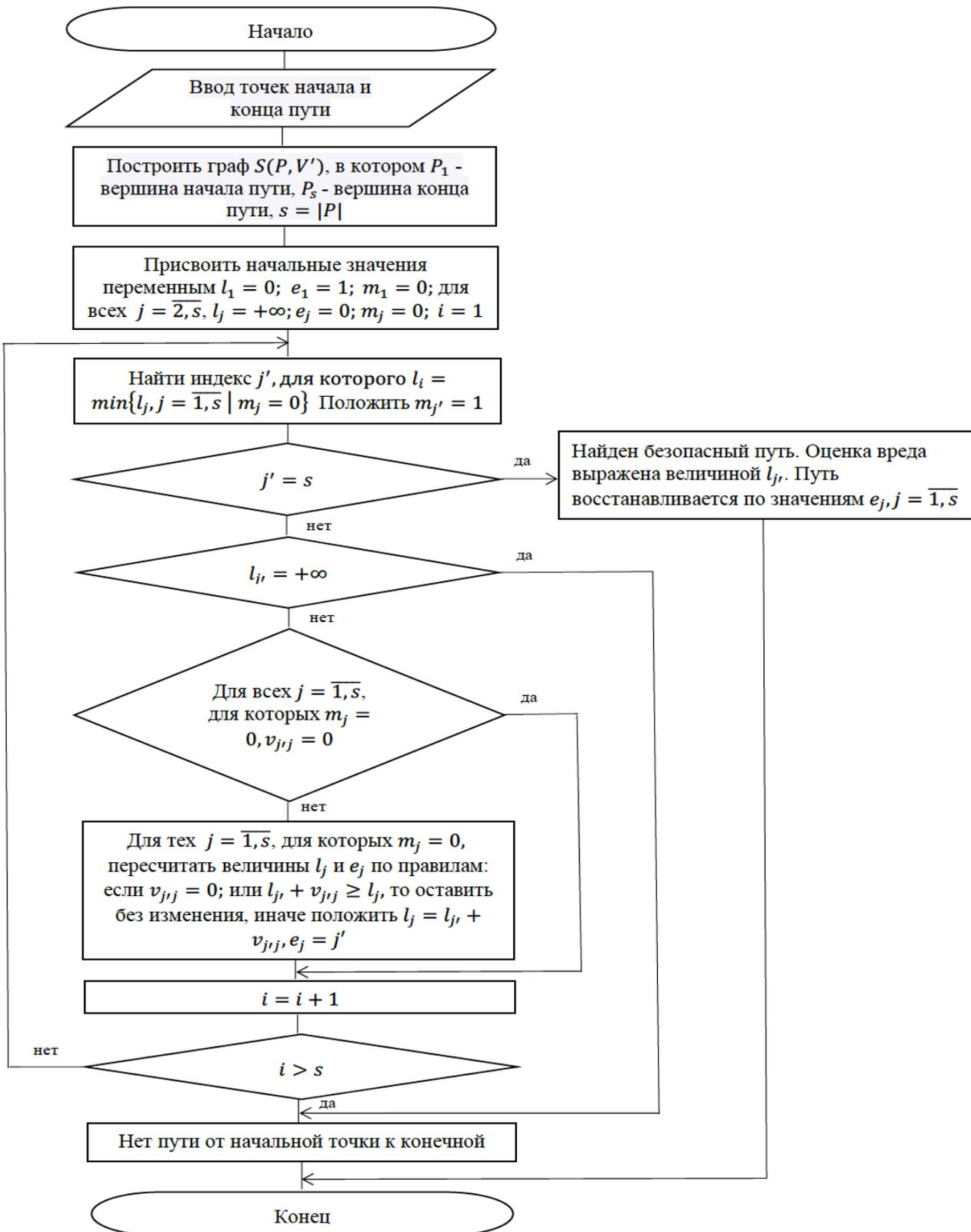
**В третьей главе** представлена аппаратно-программная реализация СППР.

Для решения задач экологического мониторинга и оптимизации маршрутов разработан аппаратно-программный комплекс, который служит источником информации для мониторинга, предоставляет более полный набор функциональных сервисов в сравнении с существующими интернет-службами и не имеет аналогов в Республике Беларусь. Аппаратная часть комплекса выполнена на микроконтроллере Arduino Nano, к которому подключены датчики для определения загрязняющих веществ воздуха (диоксида углерода, оксида углерода, метана, пропан-бутана, твердых частиц PM<sub>2.5</sub> и пр.), датчик атмосферного давления и температуры, датчик влажности воздуха. Для передачи данных на расстоянии используются технологии GSM/GPRS.

Основу аппаратно-программного комплекса составляют стационарные посты непрерывного контроля загрязнения атмосферного воздуха в городе, БЛА и передвижные лаборатории, данные от которых поступают в режиме реального времени в БД. БЛА и передвижные лаборатории используются для дополнительного мониторинга загрязнения воздуха в случае, когда имеющихся в БД сведений о состоянии воздуха недостаточно для достижения требуемой точности интерполяции содержания загрязняющих веществ в любой точке города, а также при ухудшениях экологической ситуации, связанных с аварийными выбросами загрязняющих веществ.

Для аварийных ситуаций в диссертации разработан и реализован алгоритм прогнозирования и визуализации степени загрязнения атмосферного воздуха на основе анализа взятых проб с учетом силы и направления ветра. В этом случае в качестве точек

взятия проб воздуха добавляются точки выброса и дополнительные точки по направлению распространения воздушных масс с загрязняющими веществами.



**Рисунок 1. – Алгоритм поиска оптимального пути следования с учетом уровня загрязнения воздуха**

Для поддержания в актуальном состоянии информации об уровне загрязнения атмосферного воздуха необходимо периодически брать новые пробы воздуха. Частота вылетов БЛА или выезда передвижной лаборатории обуславливается несколькими факторами, основные из которых – сила ветра, уровень загрязнения, время, прошедшее с момента предыдущего взятия проб, и требования обновления. Последняя характеристика отражает интенсивность запросов пользователей, которая в разное время суток будет отличаться.

Для оценки необходимости обновления проб воздуха введем коэффициент актуальности  $K_i^{akt}$ , показывающий оценку близости текущих данных о загрязнении воздуха в точке взятия проб воздуха с номером  $i$  к средним значениям за предыдущие сутки. Средний коэффициент актуальности для всего города будет рассчитываться как среднее арифметическое коэффициентов актуальности для всех точек взятия проб воздуха. Величина  $K_i^{akt}$  вычисляется по формуле

$$K_i^{akt} = \frac{l_i}{l_i^{cp}} \cdot \frac{V_i}{V_i^{cp}} \cdot \frac{t_i}{k_t}, \quad (2)$$

где  $l_i$  – текущее значение интегрального показателя, учитывающего загрязнение атмосферного воздуха в точке взятия проб воздуха с номером  $i$ ;  $l_i^{cp}$  – среднее значение интегрального показателя, учитывающего загрязнение атмосферного воздуха, за предыдущие сутки в точке взятия проб воздуха с номером  $i$ ;  $V_i$  – текущая скорость ветра в точке взятия проб воздуха с номером  $i$ , м/с;  $V_i^{cp}$  – среднее значение скорости ветра за предыдущие сутки в точке взятия проб воздуха с номером  $i$ , м/с;  $t_i$  – время, прошедшее с момента последнего взятия проб воздуха в точке с номером  $i$ , с;  $k_t$  – коэффициент, обуславливающий частоту вылета, с.

Как следует из формулы (2), коэффициент актуальности будет увеличиваться при увеличении скорости ветра и уровня загрязнения, а также с течением времени. Диапазон изменения значений коэффициента составит от нуля до бесконечности, при этом чем меньше значение коэффициента, тем актуальнее данные. Новый (очередной) вылет БЛА или выезд передвижной лаборатории будет осуществляться при достижении установленного значения коэффициента актуальности.

Для поиска оптимальной траектории полета предлагается следующий алгоритм:

1. Рассчитываются все значения  $K_i^{akt}$  для всех ячеек исследуемой территории.
2. Двигаясь от максимального значения всех  $K_i^{akt}$  в сторону снижения, находим другие точки со значениями  $K_i^{akt}$  меньше максимального до тех пор, пока не найдутся  $N$  точек, обновление данных в которых позволит получить заданный пользователем уровень  $K^{akt}$ .

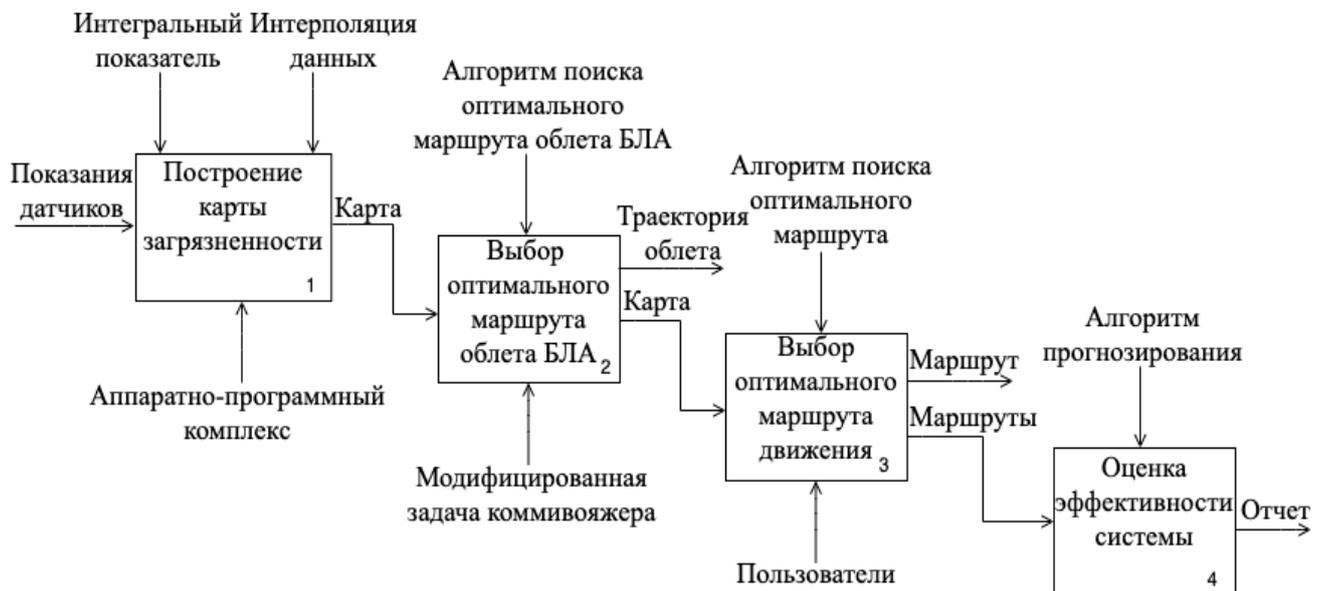
3. Для выделенных точек решается замкнутый вариант задачи коммивояжера методом случайного перебора – генерируем случайным образом  $N$

последовательностей, отражающих движение БЛА через точки, и выбираем ту из траекторий, суммарный путь которой наименьший.

Выбранный при помощи этого алгоритма путь получается короче более чем в три раза по сравнению с маршрутом, полученным методом ближайшей непосещенной вершины для ста вершин.

Итак, работу СППР можно представить по шагам: выбор точек; генерация возможных маршрутов; расчет загрязнения воздуха; выбор оптимального маршрута; прогнозирование уровня загрязнения атмосферного воздуха с учетом скорости и направления ветра.

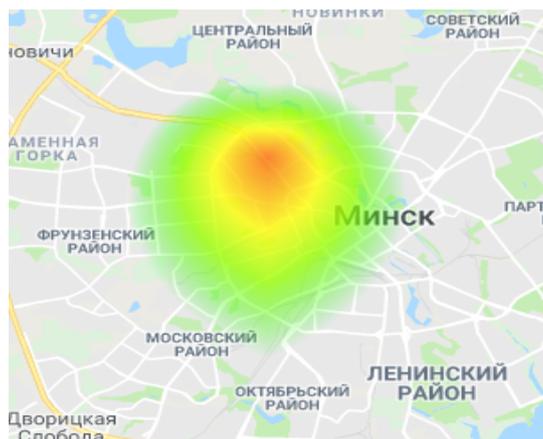
В общем виде структура предложенной СППР при выборе оптимального маршрута с учетом загрязнения воздуха представлена на рисунке 2.



**Рисунок 2. – Структура СППР при выборе оптимального маршрута с учетом загрязнения воздуха**

В четвертой главе представлены результаты применения СППР, включая алгоритм прогнозирования и способ визуализации изменения загрязнения атмосферного воздуха для составления карт загрязнения воздуха.

Для прогнозирования изменения состояния атмосферного воздуха в случае аварийных ситуаций используются модель ОНД-86 и данные о скорости и направлении ветра. Пример визуализации зон загрязнения воздуха с учетом силы и направления ветра приведен на рисунке 3. При прогнозировании распространения загрязняющих веществ в воздухе с учетом силы и направления ветра учитывается изменение силы и направления ветра в пределах города и его окрестностей (рисунок 4).



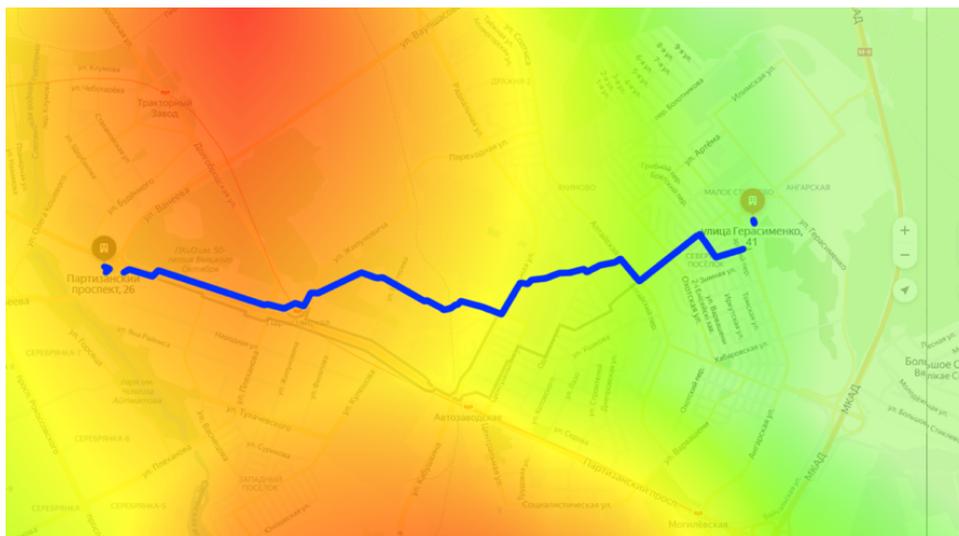
**Рисунок 3. – Визуализация загрязнения с учетом силы и направления ветра**



**Рисунок 4. – Прогнозирование движения загрязнения атмосферного воздуха с учетом изменения силы и направления ветра**

Для определения точности получаемых прогнозов были выполнены исследования, которые показали, что рассчитываемые по предложенному алгоритму ожидаемые уровни на 25–30 % точнее совпадают с натурными исследованиями в сравнении с географическими информационными системами MapInfo и ArcView. Оценки получены на выборке из более чем 500 точек. Оценка точности проводилась по модели: скорость и направление ветра, местоположение источника загрязнения. Вычисление матрицы неточностей показало, что данные ГИС имеют долгосрочный прогноз при заданном ветре, а ошибки прогнозирования зависят от моделей прогнозирования, заложенных в ГИС с временной задержкой. По предложенному нами алгоритму ожидаемые прогнозы с учетом скорости и направления ветра имеют минимальные погрешности.

При выборе оптимального маршрута движения по критерию минимизации неблагоприятного воздействия загрязнения атмосферного воздуха пользователь задает на карте в разработанной системе начальную и конечную точки пути. Далее на основе оперативных данных о загрязнении воздуха по пути следования, получаемых из БД системы, строится оптимальный маршрут (рисунок 5).



**Рисунок 5. – Отображение оптимального маршрута**

Для оценки социально-экономического эффекта от использования разработанной системы в г. Минске были опрошены 500 человек, постоянно использующих фитнес-браслеты, что позволило установить среднюю дистанцию, которую они проходили, – 6650 шагов ежедневно. Далее были оценены 100 случайно сгенерированных различных маршрутов, равномерно распределенных по всем районам города. Для начальной и конечной точек каждого маршрута была решена задача выбора оптимального маршрута движения по улицам города по критерию минимизации влияния загрязнения воздуха. В результате на оптимальных маршрутах количественная оценка вреда организму человека от загрязнения атмосферного воздуха оказалась в среднем на 12,3 % меньше, чем на исходных случайно сгенерированных маршрутах.

Ожидаемый социально-экономический эффект от снижения заболеваемости при массовом использовании разработанной СППР населением городов страны был рассчитан по уравнению регрессии, предложенному В. А. Рыбаком. Это уравнение показывает влияние загрязнения атмосферного воздуха на здоровье населения. Расчет, проведенный на основании показателей по г. Минску, показал ожидаемый социально-экономический эффект от снижения заболеваемости в размере 150,5 руб. на человека в год.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Проведен анализ существующих аппаратных и программных методов и средств мониторинга загрязнения атмосферного воздуха, обоснован выбор датчиков для контроля его качества. Разработан интегральный показатель загрязнения атмосферного воздуха, основанный на данных от выбранных датчиков в режиме реального времени, учитывающий, в отличие от известных, влияние температуры и влажности на степень неблагоприятного воздействия повышенных концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе [1; 2; 7; 12–17; 26].

2. Разработана математическая модель задачи определения перекрестков, на которых требуется взять пробы атмосферного воздуха путем полета БЛА или движения передвижной лаборатории, и предложены алгоритмы решения задачи. Разработан алгоритм поиска оптимального маршрута, учитывающий, в отличие от известных, уровень загрязнения атмосферного воздуха по пути следования и имеющуюся дорожно-транспортную сеть [5; 6; 9; 10; 23; 25].

3. Разработан алгоритм прогнозирования и визуализации качества атмосферного воздуха на основе математической модели направления и скорости ветра, учитывающий, в отличие от известных, динамическое изменение метеопараметров, что позволяет повысить точность составления карт загрязнения на 25–30 % [4; 7; 8; 11; 18].

4. Разработан алгоритм поиска оптимальных маршрутов движения БЛА или передвижной лаборатории для взятия проб воздуха в заданных точках города для актуализации данных об уровне загрязнения воздуха, учитывающий концентрацию загрязняющих веществ, силу ветра, время, прошедшее с момента предыдущего обновления, что позволяет сократить длину найденного маршрута более чем в три раза в сравнении с методом ближайшей непосещенной вершины для ста вершин, и время актуализации данных за счет исключения части точек взятия проб воздуха [5; 7–10; 22; 25; 28; 30].

5. Разработан аппаратно-программный комплекс для мониторинга загрязнения атмосферного воздуха, отличающийся набором датчиков, математическим и программным обеспечением, позволяющий осуществлять мониторинг загрязнения атмосферного воздуха в режиме реального времени [3; 11; 12; 17; 19; 22].

6. Разработана система поддержки принятия решений, включающая аппаратно-программный комплекс, в основу работы которой положено специальное математическое и программное обеспечение обработки и визуализации экологических данных, позволяющее, в отличие от известных, в

режиме реального времени осуществлять оценку и прогнозирование уровня загрязнения атмосферного воздуха в городе. Все элементы созданной системы поддержки принятия решений апробированы и подтвердили свою работоспособность. Социально-экономический эффект от применения данной системы может достигать 150,5 руб. в год для одного жителя г. Минска за счет снижения уровня заболеваемости и сокращения затрат на выплаты по больничным листам и амбулаторное лечение [7; 8; 20–24; 27–29; 31–34].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Полученные результаты могут применяться в области государственного регулирования природоохранной деятельности и инновационного развития.

1. Поддержка принятия решений при поиске оптимального маршрута в городе по критерию минимизации вреда организму от нахождения в зонах повышенного содержания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе позволит на практике находить оптимальный маршрут движения в городе с минимальным неблагоприятным воздействием на здоровье человека [5–8; 10].

2. Предложенный алгоритм прогнозирования качества атмосферного воздуха с учетом направления и скорости ветра целесообразно использовать при разработке географических информационных систем, что позволит дифференцировать территорию по степени загрязнения [4; 7; 8; 11].

3. Полученные результаты исследования рекомендуется использовать для модернизации существующей сети наблюдения за состоянием окружающей среды в Белгидромет [7–10; 31–34].

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

### Статьи в рецензируемых научных журналах

1. Рябычина, О. П. Методы и средства мониторинга загрязнения атмосферного воздуха / О. П. Рябычина, В. А. Рыбак // Проблемы инфокоммуникаций. – 2018. – № 1 (7). – С. 27–37.
2. Рябычина, О. П. Аналитический обзор аппаратных средств мониторинга загрязнения атмосферного воздуха / О. П. Рябычина, В. А. Рыбак // Весн. сувязі. – 2018. – № 3 (149). – С. 43–46.
3. Рябычина, О. П. Информационная подсистема анализа загрязнения атмосферного воздуха / О. П. Рябычина, В. А. Рыбак // Весн. сувязі. – 2019. – № 2 (154). – С. 48–52.
4. Рыбак, В. А. Моделирование переноса загрязнения окружающей среды в атмосферном воздухе и водных объектах / В. А. Рыбак, О. П. Рябычина, А. Д. Гриб // Весн. сувязі. – 2019. – № 5 (157). – С. 51–55.
5. Рябычина, О. П. Поиск оптимального маршрута с учетом загрязнения окружающей среды (воздуха) / О. П. Рябычина // Весн. сувязі. – 2019. – № 6 (158). – С. 50–53.
6. Пацей, Н. Е. Применение эволюционных алгоритмов для поиска оптимального маршрута / Н. Е. Пацей, О. П. Рябычина // Проблемы инфокоммуникаций. – 2020. – № 1(11). – С. 38–43.
7. Рыбак, В. А. Система поддержки принятия решений при выборе оптимального маршрута движения людей с учетом загрязненности воздуха / В. А. Рыбак, О. П. Рябычина // Проблемы инфокоммуникаций. – 2020. – №1 (11). – С. 68–74.
8. Рыбак, В. А. Система экологического мониторинга атмосферного воздуха / В. А. Рыбак, О. П. Рябычина // Доклады БГУИР. – 2020. – № 4, т. 18. – С. 36–43.
9. Карпук, А. А. Математические модели и алгоритмы оценки степени загрязнения воздуха в городах / А. А. Карпук, О. П. Рябычина // Весн. сувязі. – 2020. – № 5 (163). – С. 36–39.
10. Карпук, А. А. Математические модели и алгоритмы выбора оптимального маршрута передвижения в городах с учетом загрязнения воздуха / А. А. Карпук, О. П. Рябычина // Весн. сувязі. – 2020. – № 6 (164). – С. 36–39.

### Статьи в других научных изданиях

11. Рыбак, В. А. Аппаратное обеспечение системы для экологической диагностики загрязнения атмосферного воздуха / В. А. Рыбак, О. П. Рябычина // Изв. высш. учеб. заведений России. Радиоэлектроника. – 2020. – № 3, т. 23. – С. 93–99.

12. Рыбак, В. А. Аппаратно-программный комплекс для мониторинга загрязнения атмосферного воздуха и выбора оптимального маршрута движения / В. А. Рыбак, О. П. Рябычина // Вестн. КамчатГТУ. – 2020. – № 52. – С. 6–17.

### Статьи в сборниках материалов научных конференций

13. Рябычина, О. П. Проблемы экологического загрязнения / О. П. Рябычина, В. С. Аникеева, В. А. Гвоздухина, А. А. Савчиц // Новые информационные технологии в телекоммуникациях и почтовой связи : материалы XVII науч.-техн. конф. студентов и молодых специалистов, 18–19 мая 2017 г. – Минск : УО БГАС, 2017. – С. 115–116.

14. Рябычина, О. П. Автоматизированные системы мониторинга атмосферного воздуха в разных странах / О. П. Рябычина, В. А. Рыбак // Современные средства связи : материалы XXII Междунар. науч.-техн. конф., 19–20 окт. 2017 г., Минск, Респ. Беларусь / редкол.: А. О. Зеневич [и др.]. – Минск : БГАС, 2017. – С. 218–220.

15. Рябычина, О. П. Мониторинг загрязнения атмосферного воздуха / О. П. Рябычина, В. А. Рыбак // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы междунар. науч.-техн. конф. (Могилев, 26–27 апр. 2018 г.) [Электронный ресурс] / редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Беларус.-Рос. ун-т, 2018. – С. 365–366. – Режим доступа: <http://bru.by/content/science/conferences/materialsconferences>. – Дата доступа: 03.05.2018.

16. Рябычина, О. П. Аппаратный программный комплекс для мобильного экологического мониторинга / О. П. Рябычина, В. Г. Селевцов // Новые информационные технологии в телекоммуникациях и почтовой связи : материалы XVIII науч.-техн. конф. студентов и молодых специалистов, 16–17 мая 2018 г. – Минск : УО БГАС, 2018. – С. 43.

17. Ryabychina, O. P. Modern problems environmental air pollution / O. P. Ryabychina // New information technologies in telecommunications and postal communications : materials of the XVIII scientific and technical conference of students and young professionals, 16–17 May 2018 – Minsk : BGAS, 2018. – P. 85–86.

18. Рябычина, О. П. Автоматизированная система обработки и отображения экологических данных / О. П. Рябычина, В. А. Рыбак // Современные средства связи : материалы XXIII Междунар. науч.-техн. конф., 18–19 окт. 2018 г. / редкол.: А. О. Зеневич [и др.]. – Минск : БГАС, 2018. – С. 169.

19. Рябычина, О. П. Автоматизированная система визуализации результатов мониторинга атмосферного воздуха / О. П. Рябычина, Е. А. Бут-Гусаим // Современные средства связи : материалы XXIII Междунар. науч.-техн. конф., 18–19 окт. 2018 г. / редкол.: А. О. Зеневич [и др.]. – Минск : БГАС, 2018. – С. 135–136.

20. Рябычина, О. П. Повышение эффективности системы мониторинга атмосферного воздуха / О. П. Рябычина, В. А. Рыбак // Проблемы экологии и экологической безопасности: материалы VI Междунар. заоч. науч.-практ. конф., посвящ. Всемир. дню охраны окружающей среды, 5 июня 2019 г. / редкол.:

И. И. Полевода [и др.]. – Минск : Ун-т гражд. защиты МЧС Беларуси, 2019. – С. 78–79.

21. Рябычина, О. П. Методы и средства интерполяции данных по загрязнению атмосферного воздуха / О. П. Рябычина, А. А. Бородавко // Новые информационные технологии в телекоммуникациях и почтовой связи : материалы XIX науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых специалистов, 14 мая – 15 мая 2019 г. / редкол.: А. О. Зеневич [и др.]. – Минск : БГАС, 2019. – С. 37.

22. Рябычина, О. П. Автоматизированная система визуализации результатов мониторинга атмосферного воздуха / О. П. Рябычина, Е. А. Бут-Гусаим // Новые информационные технологии в телекоммуникациях и почтовой связи : материалы XIX науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых специалистов, 14 мая – 15 мая 2019 г., Минск / редкол.: А. О. Зеневич [и др.]. – Минск : БГАС, 2019. – С. 37–38.

23. Рябычина, О. П. Разработка веб-сервиса для поиска оптимального маршрута движения с учетом загрязнения воздуха / О. П. Рябычина, М. В. Колбун // Новые информационные технологии в телекоммуникациях и почтовой связи : материалы XIX науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых специалистов, 14 мая – 15 мая 2019 г., Минск / редкол.: А. О. Зеневич [и др.]. – Минск : БГАС, 2019. – С. 41

24. Рябычина, О. П. Программное средство интерполяции данных / О. П. Рябычина, Н. С. Козловский // Новые информационные технологии в телекоммуникациях и почтовой связи : материалы XIX науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых специалистов, 14 мая – 15 мая 2019 г., Минск / редкол.: А. О. Зеневич [и др.]. – Минск : БГАС, 2019. – С. 54

25. Карпук, А. А. Математическая модель задачи выбора оптимального маршрута движения в городе с учетом загрязнения воздуха / А. А. Карпук, О. П. Рябычина // Современные средства связи : материалы XXV Междунар. науч.-техн. конф., 22–23 окт. 2020 г. / редкол.: А. О. Зеневич [и др.]. – Минск : БГАС, 2020. – С. 176–177.

26. Рябычина, О. П. Обоснование методов и средств передачи данных от датчиков в аппаратно-программном комплексе мониторинга загрязнения атмосферного воздуха / О. П. Рябычина, О. Р. Ходасевич // Современные средства связи : материалы XXV Междунар. науч.-техн. конф., 22–23 окт. 2020 г. / редкол.: А. О. Зеневич [и др.]. – Минск : БГАС, 2020. – С. 19–21.

27. Рябычина, О. П. Модель системы мониторинга состояния автомобильной дороги / О. П. Рябычина, А. Л. Синяков // Современные средства связи : материалы XXV Междунар. науч.-техн. конф., 22–23 окт. 2020 г. / редкол.: А. О. Зеневич [и др.]. – Минск : БГАС, 2020. – С. 118–119.

### **Тезисы докладов**

28. Рябычина, О. П. Совершенствование системы мониторинга атмосферного воздуха / О. П. Рябычина // Электронные системы и технологии : 55-я юбилей. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 22–26 апр. 2019 г. :

сб. тез. докл. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск : БГУИР, 2019. – С. 187.

29. Рябычина, О. П. Информационная система экологического мониторинга атмосферного воздуха / О. П. Рябычина, В. А. Рыбак // Информационные технологии в промышленности, логистике и социальной сфере ITI\*2019 : тезисы докладов, Минск, 23–24 мая 2019 г. / редкол.: А. В. Тузиков [и др.]. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2019. – С. 178–180.

30. Рябычина, О. П. Алгоритм полета беспилотного летательного аппарата для совершенствования системы мониторинга атмосферного воздуха / О. П. Рябычина // 56-я научно-техническая конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 18–20 мая 2020 г. : сб. тез. докл. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск : БГУИР, 2020. – С. 218–219.

### Патенты

31. Погодная станция для определения состояния автомобильных дорог : полез. модель ВУ 11881 / О. П. Рябычина, В. А. Рыбак. – Опубл. 28.02.2019.

32. Погодная станция для диагностики состояния автомобильных дорог : полез. модель ВУ 11942 / О. П. Рябычина, В. А. Рыбак, Амро Рабиа. – Опубл. 28.02.2019.

33. Система мониторинга состояния автомобильной дороги : заявка ВУ № 20190187 / О. П. Рябычина, В. А. Рыбак, Амро Рабиа. – Опубл. 19.06.2019.

34. Погодная станция для мониторинга состояния автомобильных дорог : полез. модель ВУ 12070 / О. П. Рябычина, В. А. Рыбак, Амро Рабиа. – Опубл. 31.08.2019.



## РЭЗІЮМЭ

Рабычына Вольга Пятроўна

### **Сістэма падтрымкі прыняцця рашэнняў пры выбары аптымальнага маршруту руху пешаходаў у горадзе з улікам забруджвання паветра**

**Ключавыя словы:** забруджванне паветра, сістэма падтрымкі прыняцця рашэнняў, аптымальны маршрут, інтэрпаляцыя.

**Мэта работы:** распрацоўка і апрабацыя сістэмы падтрымкі прыняцця рашэнняў пры выбары аптымальнага небяспечнага маршруту руху пешаходаў у горадзе з улікам забруджвання паветра.

**Метады даследавання:** у рабоце прымяняюцца метады матэматычнага мадэлявання складаных сістэм, сістэмнага аналізу, прыняцця рашэнняў, метады праектавання і рэалізацыі інфармацыйных сістэм.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** распрацаваны функцыянальная структура сістэмы падтрымкі прыняцця рашэнняў пры выбары аптымальнага маршруту руху з улікам забруджвання паветра; інтэгральны паказчык забруджвання атмасфернага паветра, заснаваны на даных ад выбраных датчыкаў у рэжыме рэальнага часу, які дазваляе ўлічваць неспрыяльнае ўздзеянне на здароўе чалавека з улікам тэмпературы і вільготнасці; апаратна-праграмны комплекс для мабільнага маніторынгу забруджвання атмасфернага паветра; матэматычная мадэль задачы вызначэння скрыжаванняў, на якіх патрабуецца ўзяць пробы атмасфернага паветра шляхам палету БЛА або руху перасоўнай лабараторыі, і прапанаваны алгарытмы рашэння задачы; матэматычныя мадэлі і прапанаваны алгарытмы рашэння задач пошуку аптымальных маршрутаў палету БЛА і руху перасоўнай лабараторыі па скрыжаваннях горада для ўзяцця проб атмасфернага паветра; матэматычная мадэль і прапанаваны алгарытм пошуку аптымальнага маршруту ў горадзе па крытэрыі мінімізацыі шкоды арганізму ад знаходжання ў зонах павышанага ўтрымання забруджвальных рэчываў у атмасферным паветры. Прапанаваны алгарытм прагназавання ўзроўню забруджвання атмасфернага паветра для складання актуальных карт на аснове мадыфікаванай metodyкі ОНД-86. Акрамя таго, распрацавана сістэма падтрымкі прыняцця рашэнняў, якая ўключае апаратна-праграмны комплекс, у аснову работы якой пакладзена спецыяльнае матэматычнае і праграмнае забеспячэнне апрацоўкі і візуалізацыі экалагічных дадзеных. Сацыяльна-эканамічны эффект ад прымянення гэтай сістэмы можа дасягаць 150,5 руб. у год для жыхара г. Мінска за кошт зніжэння ўзроўню захворвання насельніцтва і скарачэння выдаткаў на выплаты па бальнічных лістах.

**Ступень выкарыстання:** атрыманыя вынікі ўкаранены на прадпрыемстве і ў навучальны працэс.

**Вобласць прымянення:** сістэма экалагічнага маніторынгу атмасфернага паветра ўрбанізаванай тэрыторыі, геаінфармацыйныя сістэмы.

## РЕЗЮМЕ

Рябычина Ольга Петровна

### **Система поддержки принятия решений при выборе оптимального маршрута движения пешеходов в городе с учетом загрязнения воздуха**

**Ключевые слова:** загрязнение воздуха, система поддержки принятия решений, оптимальный маршрут, интерполяционный кригинг.

**Цель работы:** разработка и апробация системы поддержки принятия решений при выборе оптимального безопасного маршрута движения пешеходов в городе с учетом загрязнения воздуха.

**Методы исследования:** в работе применяются методы математического моделирования сложных систем, системного анализа, принятия решений, методы проектирования и реализации информационных систем.

**Полученные результаты и их новизна:** Разработаны функциональная структура системы поддержки принятия решений при выборе оптимального маршрута движения с учетом загрязнения воздуха; интегральный показатель загрязнения атмосферного воздуха, основанный на данных от выбранных датчиков в режиме реального времени, позволяющий учитывать неблагоприятное воздействие на здоровье человека с учетом температуры и влажности; аппаратно-программный комплекс для мобильного мониторинга загрязнения атмосферного воздуха; математическая модель задачи определения перекрестков, на которых требуется взять пробы атмосферного воздуха путем полета БЛА или движения передвижной лаборатории, и предложены алгоритмы решения задачи; математические модели и предложены алгоритмы решения задач поиска оптимальных маршрутов полета БЛА и движения передвижной лаборатории по перекресткам города для взятия проб атмосферного воздуха; математическая модель и предложен алгоритм поиска оптимального маршрута в городе по критерию минимизации вреда организму от нахождения в зонах повышенного содержания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе. Предложен алгоритм прогнозирования уровня загрязнения атмосферного воздуха для составления актуальных карт на основе модифицированной методики ОНД-86. Кроме того, разработана система поддержки принятия решений, включающая аппаратно-программный комплекс, в основу работы которой положено специальное математическое и программное обеспечение обработки и визуализации экологических данных. Социально-экономический эффект от применения этой системы может достигать 150,5 руб. в год для жителя г. Минска за счет снижения уровня заболеваемости населения и сокращения затрат на выплаты по больничным листам.

**Степень использования:** полученные результаты внедрены на предприятиях и в учебный процесс.

**Область применения:** система экологического мониторинга атмосферного воздуха урбанизированной территории, геоинформационные системы.

## SUMMARY

Ryabychina Olga Petrovna

### **Decision support system for choosing the optimal the route of pedestrians traffic in the city, taking into account air pollution**

**Keywords:** air pollution, decision support system, optimal route, interpolation kriging.

**Objective:** development and testing of a decision support system when choosing the optimal safe route for pedestrians in the city, taking into account air pollution.

**Methods:** The work uses methods of mathematical modeling of complex systems, system analysis, decision making, methods of design and implementation of information systems.

**The results and their novelty:** The functional structure of a decision support system for choosing the optimal route taking into account air pollution has been developed. An integral indicator of atmospheric air pollution has been developed, based on data from the selected sensors in real time, allowing to take into account the adverse impact on human health, taking into account temperature and humidity. A hardware and software complex for mobile monitoring of atmospheric air pollution has been developed. A new mathematical model has been developed for the problem of identifying intersections where it is required to take samples of atmospheric air by a UAV flight or the movement of a mobile laboratory, and algorithms for solving the problem have been proposed. Mathematical models have been developed and algorithms have been proposed for solving the problems of finding the optimal flight routes for UAVs and the movement of a mobile laboratory at the crossroads of the city for taking atmospheric air samples. A mathematical model has been developed and an algorithm has been proposed for finding the optimal route in the city according to the criterion of minimizing harm to the body from being in areas with a high concentration of pollutants in the air. An algorithm for forecasting and visualizing the level of atmospheric air pollution for drawing up actual maps based on the modified OND-86 method is proposed. A decision support system has been developed, including a hardware and software complex, which is based on special mathematical and software for processing environmental data. The socio-economic effect of the use of this system can reach 150,5 rubles per year for resident of the city of Minsk due to a decrease in the incidence rate of the population and a reduction in the cost of sick leave payments.

**Use degree:** the results are implemented in the enterprise and in the educational process.

**Scope:** system of ecological monitoring of atmospheric air of the urbanized territory, geographic information systems.

Научное издание

**РЯБЫЧИНА**  
**Ольга Петровна**

**Система поддержки принятия решений при выборе  
оптимального маршрута движения пешеходов в городе  
с учетом загрязнения воздуха**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.13.01 – системный анализ, управление  
и обработка информации

Подписано в печать . .2021 г. Формат 60x84 $\frac{1}{16}$ . Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 1,40 Уч.-изд. л. 1,09 Тираж 70 экз. Заказ № 793

---