

**АНТРОПОВ КОНСТАНТИН МИХАЙЛОВИЧ**

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО  
ВОЗДУХА МЕГАПОЛИСА И ПРОМЫШЛЕННОГО ЦЕНТРА ВЫБРОСАМИ  
АВТОТРАНСПОРТА И ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

**Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ**

**Автореферат**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук**

**Екатеринбург – 2012**

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор  
Вараксин Анатолий Николаевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор  
Мелких Алексей Вениаминович  
кандидат физико-математических наук, доцент  
Соколов Сергей Юрьевич

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт горного дела  
Уральского отделения Российской академии  
наук, г. Екатеринбург

Защита состоится 21 февраля 2012 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.285.13 при ФГАОУ ВПО «Уральском Федеральном Университете имени первого Президента России Б.Н.Ельцина» по адресу: 620002, г.Екатеринбург, ул. Мира, 19, аудитория I главного учебного корпуса (зал ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале библиотеки ФГАОУ ВПО «Уральского Федерального Университета имени первого Президента России Б.Н.Ельцина».

Отзыв на автореферат (два заверенных экземпляра) просим направить по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», ученому секретарю университета.

Автореферат разослан 19 января 2012 года.

Ученый секретарь диссертационного  
совета Д 212.285.13,

кандидат физ.-мат. наук, профессор

Рогович В.И.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Применение математического моделирования и основанных на нем программных пакетов в той или иной степени позволяет решать задачи расчета загрязнения атмосферного воздуха населенных пунктов. При описании загрязнения крупных городов и промышленных центров возникают значительные сложности, связанные с существенным вкладом в общее загрязнение *локальных* источников (автотранспорт, карьеры и т.п.). Это приводит к сильной неоднородности загрязнения атмосферного воздуха в пределах города, вследствие чего требуются особые (по сравнению с существующими) методы описания загрязнения атмосферного воздуха (необходимо высокое пространственное разрешение порядка 15 м).

Лучшим на данный момент пространственным разрешением обладает развивающийся метод описания загрязнения атмосферного воздуха – Land Use Regression (далее LUR). Метод заключается в построении математических моделей загрязнения воздуха на основе экспериментальных данных о загрязнении и данных геоинформационных систем (ГИС). На данный момент такие модели были построены для нескольких городов в Европе и Северной Америке, однако метод LUR до сих пор не стандартизирован, и способы его применения различаются в каждом исследовании. Это связано в первую очередь со значительными различиями исследуемых городов, особенности которых не позволяли создать унифицированный способ моделирования. Во-вторых, метод LUR продолжает развиваться: улучшается качество получаемых результатов и разрешаются трудности и проблемы моделирования. В России такой метод до настоящего исследования не применялся. Поэтому, разработка нового математического метода моделирования для получения подробной карты пространственного распределения загрязнения атмосферного воздуха мегаполиса и промышленной зоны, разрешение которой позволило бы проводить расчет экспозиции участников эпидемиологических исследований, является актуальной задачей.

Подробная картина пространственного распределения концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе необходима для решения многих

задач: для идентификации конкретных источников загрязнения данной территории; для разработки мероприятий по эффективному сокращению выбросов; для количественной оценки влияния загрязнения воздуха на здоровье населения; для планирования строительства транспортных узлов и социально-значимых учреждений.

**Цель работы и задачи исследования.** Целью диссертационной работы является разработка и анализ регрессионных картографических моделей для описания пространственного распределения загрязнителей атмосферного воздуха с высоким пространственным разрешением (~10 м) на основе экспериментальных данных о загрязнении воздуха и географической информации. Модели предназначены для построения карты загрязнения исследуемой территории и оценки токсической экспозиции для населения, что позволит в дальнейшем исследовать влияние загрязнения атмосферного воздуха на здоровье населения.

Для достижения поставленной цели в диссертации решены следующие задачи:

1. Разработана новая методика построения моделей загрязнения атмосферы города с высоким пространственным разрешением (методика основана на идеологии Land Use Regression). Для этого:

- сформулирован алгоритм проведения измерений концентраций загрязняющих воздух веществ инструментальными методами;

- разработан способ обработки географических данных;

- предложены новые подходы к построению статистических регрессионных моделей описания экспериментальных данных о загрязнении атмосферного воздуха,

- созданы новые алгоритмы и проведен ряд численных экспериментов для проверки адекватности полученных математических моделей.

2. Построена регрессионная модель загрязнения атмосферы г.Екатеринбург диоксидом азота.

3. Построена модель загрязнения атмосферы г.Сухой Лог (Свердловская область) взвешенными аэрозольными частицами.

4. Проведены расчеты экспозиции  $\text{NO}_2$  для населения Екатеринбурга и экспозиции взвешенных частиц для населения Сухого Лога.

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

1. Разработанная методика моделирования загрязнения атмосферы для мегаполисов и промышленных центров является эффективным инструментом построения моделей высокого качества с малым числом (2-4) объясняющих переменных.

2. Линейные модели регрессионной картографии позволяют анализировать нелинейный профиль загрязнения около автотрассы, на основе чего возможен предметный выбор наиболее адекватной модели загрязнения.

3. Распределение поля концентрации  $\text{NO}_2$  в мегаполисе (например, в г.Екатеринбург) с пространственным разрешением порядка 15 м можно описать регрессионной моделью, включающей переменные Road (дороги города) и Veg (плотность застройки).

4. Для описания распределения поля концентрации взвешенных веществ в промышленном центре (например, г. Сухой Лог) с пространственным разрешением порядка 15 м и высоким (более 70%) коэффициентом детерминации требуется не менее четырех объясняющих переменных, построенных на векторной карте города OpenStreetMap – Road (дороги города), Buildings (плотность застройки), Industrial (промышленная зона) и Quarry (добывающие карьеры).

### **Научная новизна:**

1. Предложен новый метод построения моделей загрязнения атмосферного воздуха выбросами автотранспорта и промышленных предприятий. Новизна заключается в разработке новых переменных для моделирования (Road, Veg, Carrier) и в новом способе статистического анализа полученных экспериментальных данных, что позволяет получить лучшие в сравнении со стандартным методом модели (коэффициент детерминации выше на 10%).

2. Построена новая модель загрязнения атмосферы мегаполиса (на примере г.Екатеринбург) диоксидом азота и выполнен анализ особенностей полученной карты загрязнения. Сравнение с известными методами интерполяции (Кригинг) показывает явные преимущества новой модели: полученная карта обладает лучшим пространственным разрешением и более точно отображает распределение загрязнения  $\text{NO}_2$  вдоль магистралей города.

3. Впервые проведен расчет персональной экспозиции диоксидом азота в атмосферном воздухе для большого числа детей-дошкольников Екатеринбурга. Новизна заключается в новой методике расчета персональной экспозиции, в которой используются новые данные о загрязнении в разных местах пребывания ребенка.

4. Построена новая модель загрязнения атмосферы промышленного центра (на примере г. Сухой Лог) взвешенными аэрозольными частицами. Сравнение с расчетными моделями (ПО «Эколог», ОНД-86) показывает явные преимущества новой модели: более точная картина пространственного распределения загрязнения, отражающая наблюдаемое в городе значительное вторичное пыление в местах жилищной застройки, особенно от грунтовых автомобильных дорог.

**Практическая значимость работы.** Выполненные измерения концентраций  $\text{NO}_2$ , созданная геоинформационная модель города, проведенный статистический анализ полученных на ее основе переменных-предикторов позволил построить карту загрязнения г.Екатеринбург диоксидом азота с высоким пространственным разрешением. Карта загрязнения города может быть использована органами городского управления для оценки экспозиции токсикантов атмосферного воздуха на население города и выделения мест, опасных для проживания, при планировании городской застройки и ее изменении. Аналогичная работа выполнена для г. Сухой Лог. Результаты моделирования загрязнения атмосферного воздуха используются: 1) в Екатеринбургском медицинском научном центре профилактики и охраны здоровья рабочих промышленных предприятий Роспотребнадзора (имеется акт внедрения); 2) в Центре детской экопатологии г.Екатеринбург.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 07-04-96120 и программы Президиума РАН «Фундаментальные науки – медицине», проект ФН-М № 09-П-2-1027.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы представлены на 5-ой международной конференции «Экологические и гидрометеорологические проблемы больших городов и промышленных зон», Санкт-Петербург, 2009, на IV Съезде физиологов Урала с международным участием, Екатеринбург, 2009, на III Всероссийской научно-практической (заочной)

конференции «Актуальные вопросы развития современной науки, техники и технологий», Москва, 2011.

**Публикации.** Основное содержание диссертации представлено в 7 публикациях, из них 5 в журналах из списка ВАК.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 109 наименований, 3 приложений и содержит 139 страниц основного машинописного текста, 38 рисунков, 9 таблиц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность проблемы, сформулированы цель и основные задачи исследования; дается краткая оценка новизны результатов, показана практическая значимость полученных результатов и представлены выносимые на защиту научные положения.

**В первой главе** *приведен обзор существующих методов оценки экспозиции вредными веществами, обзор методов описания загрязнения атмосферного воздуха городов, рассмотрена возможность применения регрессионных моделей, метода группового учета аргументов и нейронных сетей для создания моделей загрязнения атмосферного воздуха.*

Для оценки влияния загрязнения атмосферного воздуха на здоровье необходимы точные данные об экспозиции. Применяемые в настоящее время методы имеют ряд серьезных ограничений. Использование данных стационарных постов мониторинга не дает точных оценок персональной экспозиции; стоимость портативных устройств измерения не позволяет проводить исследования с большим числом участников; исследование с помощью ГИС дают лишь косвенные оценки загрязнения, происходит потеря информации о величинах концентрации.

В первой главе рассмотрены три метода получения данных о загрязнении воздуха: методы пространственной интерполяции, традиционные методы моделирования рассеивания и метод Land Use Regression (LUR, прототип нашего исследования).

Метод LUR заключается в следующем. Первоначально измеряются уровни загрязнения атмосферного воздуха в ограниченном числе мест. Далее для каждого места измерения вычисляется ряд географических переменных, которые, как

предполагают, могут быть связаны с загрязнением. Используются географические переменные, описывающие местоположение точек измерения: тип землепользования, плотность застройки, показатели интенсивности автомобильного движения и др. Затем проводится регрессионный анализ для определения взаимосвязей измеренных концентраций и полученных географических переменных. В результате получается регрессионное уравнение, которое может быть использовано для оценки концентраций загрязняющих веществ в любом месте, для которого известны географические переменные (в любой точке города).

Традиционный метод LUR использует регрессионный анализ для создания моделей загрязнения. В первой главе представлены этот и другие методы построения линейных моделей и рассмотрена их применимость для решения поставленной в работе задачи.

Подробно рассмотрены различные варианты регрессионного анализа [Дрейпер Н., Смит Г., 1986], в том числе метод группового учета аргументов (МГУА). Алгоритмы МГУА заключаются в автоматизации нахождения взаимосвязей в данных и выбора оптимальной структуры модели. Проанализирован метод нейронных сетей – класс аналитических методов, построенных на принципах обучения мыслящих существ и функционирования мозга [Круглов В.В., 2002].

**Вторая глава** посвящена разработке метода регрессионной картографии, предназначенного для создания математических моделей загрязнения атмосферного воздуха и построения карт загрязнения. В главе описаны алгоритмы проведения инструментальных измерений, описан сбор и обработка необходимых для моделирования географических данных, значительное внимание уделено разработке методики статистической обработки полученных экспериментальных данных, созданию модели загрязнения и анализу ее адекватности.

Идеология метода LUR была принята за основу предлагаемого нами способа моделирования загрязнения атмосферного воздуха. В ключе общей идеи LUR, но с учетом местных особенностей, а также с коррекцией существующих недостатков традиционного метода был сформирован новый метод описания пространственного распределения загрязнителей атмосферного воздуха, который мы предлагаем называть *методом регрессионной картографии*.

*Проведение измерительной кампании* – первый этап исследования, от качества проведения которого критически зависит итоговый результат моделирования. На данном этапе необходимо выбрать изучаемый токсикант и соответствующий метод его измерения, выбрать время, длительность и количество измерений концентраций загрязняющих веществ; наиболее важным этапом является правильный выбор мест измерений.

В ходе работы было проведено 3 серии измерений: две серии измерений для моделирования распределения концентраций NO<sub>2</sub> на территории г.Екатеринбург и одна для взвешенных аэрозольных частиц в г.Сухой Лог. Для проведения измерительных кампаний были разработаны три различных способа выбора мест измерений. Они могут быть использованы для любых условий, в которых может оказаться исследователь: в отсутствии информации о пространственном распределении загрязнения в исследуемом городе, в условиях, когда можно использовать ранее созданные карты загрязнения города, а также в условиях, когда ранее созданные карты используются лишь частично.

Второй этап – *сбор и обработка доступных географических данных*. В данном исследовании предлагается для создания моделей загрязнения городов использовать следующие источники географических данных: картографические данные © Участники OpenStreetMap, CC-BY-SA: дороги и здания, тип землепользования (жилая застройка, промышленный район), спутниковые снимки LandSat и высотные данные SRTM. На их основе был выполнен расчет переменных модели. Векторные данные были переведены в растровые с разрешением 15м, после чего для всей территории проводились расчеты плотности с различными размерами буферных зон – с радиусами от 50м до 1км. Общее число полученных переменных 76 – в Екатеринбурге, 62 – в г.Сухой Лог. Рассчитанные переменные по своему назначению могут быть разделены на семь групп: 1) описывающие дороги города (дороги города разделены на 3 категории согласно интенсивности движения автотранспорта); 2) парковые и лесные зоны; 3) водоемы; 4) жилые и коммерческие здания; 5) промышленные здания и территории; 6) индекс NDVI (индекс плотности растительности) – описание территории города, полученное на основе спутниковых снимков; 7) Высота над уровнем моря по данным SRTM.

Помимо перечисленных переменных в данном исследовании была предложена новая идея для создания дополнительных переменных – а именно предложено использовать данные иных систем моделирования – расчетные модели и методы интерполяции измеренных концентраций.

Третий этап исследования – *построение математических моделей загрязнения*. В работе предложен новый алгоритм статистического моделирования для построения регрессионной модели загрязнения. Вместо традиционного метода построения модели был разработан расширенный метод, который, за счет введения дополнительных этапов, обладает рядом преимуществ. В модель попадают переменные, отображающие все важные с предметной точки зрения источники загрязнения. Новый подход учитывает возможную сильную корреляционную связь между самими переменными-предикторами, которая может привести к искажению предметной интерпретации модели.

Построение модели загрязнения начинается с двухфакторного анализа, который включает в себя расчет парных коэффициентов корреляции Пирсона и Спирмена между измеренными значениями концентрации загрязнителя и переменными, которые претендуют на роль предикторов в регрессионной модели, и предметный анализ соответствующих диаграмм рассеяния.

Следующий шаг – создание новых интегральных переменных, который призван решить возникающие трудности описания сети автомобильных дорог города. В традиционном методе LUR для оптимального описания автомобильных дорог требуется 4-8 переменных с различными буферными зонами. Мы предлагаем создать новую *интегральную переменную*, лучше всего с предметной точки зрения описывающую влияние дорог на концентрацию загрязнителей (далее *переменную Road*). Преимущества *Road* заключаются в том, что данная переменная создается не только на основе статистических принципов, но также с учетом предметного смысла разрабатываемой модели.

Для создания переменной *Road* использован метод группового учета аргументов. Выбран комбинаторный алгоритм МГУА (алгоритм полного перебора всех возможных вариантов), использующий для выбора наиболее адекватной

модели критерий регулярности и некоторые дополнительные условия, специфичные для данной предметной области.

После построения новой переменной *Road*, модель загрязнения атмосферного воздуха строится методом пошаговой регрессии.

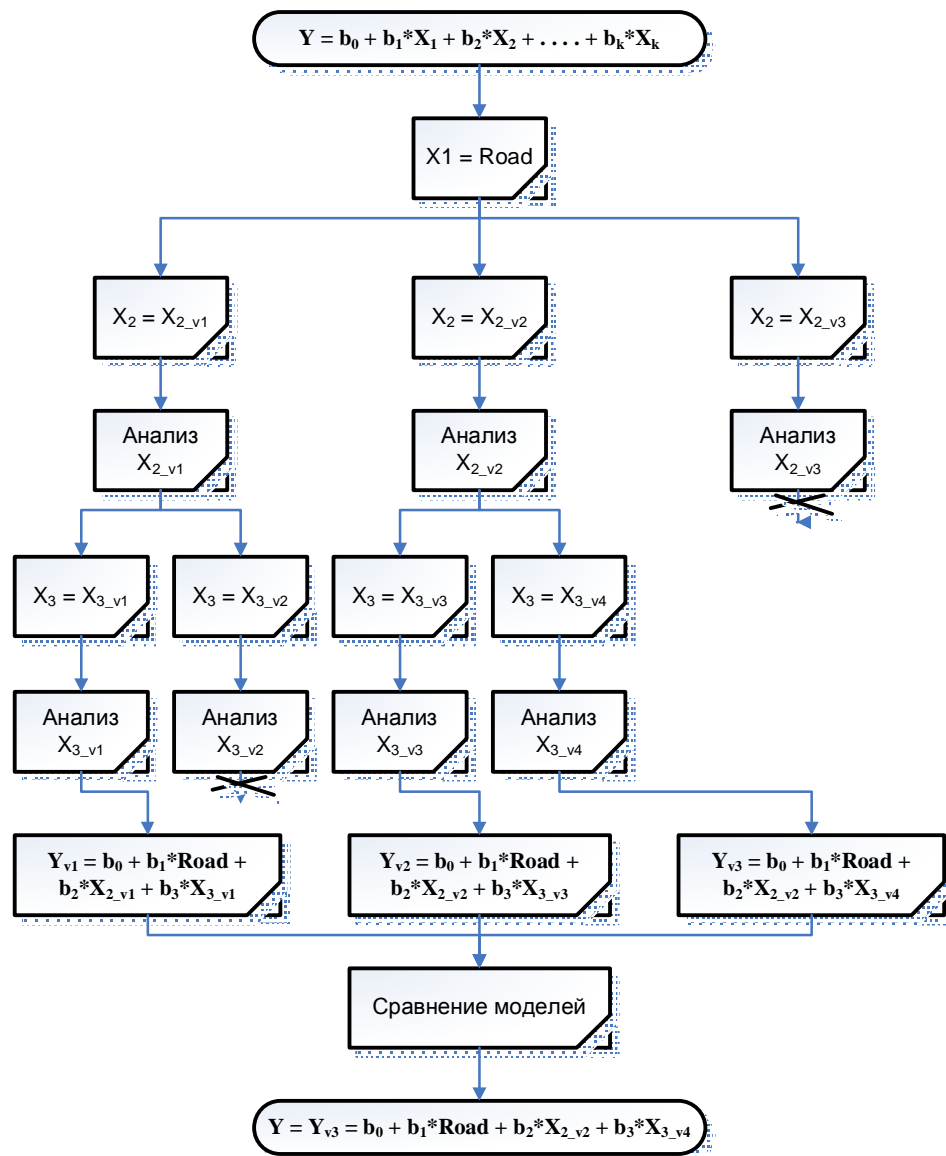


Рис.1. Алгоритм создания регрессионной модели загрязнения

Переменная *Road*, исходя из предметного смысла, является наиболее значимой переменной в модели загрязнения. Поэтому, формирование регрессионного уравнения (модели) всегда начинается с переменной *Road* ( $X_1$ ), после чего остается задача выбора второй и последующих переменных; переменные  $X_2$ ,  $X_3$  и т.д уже не имеют такой высокой статистической значимости, как *Road*, поэтому возможны ситуации, когда несколько разных переменных могут

претендовать на их роль. Это приводит к появлению *нескольких* вариантов моделей загрязнения, каждую из которых необходимо исследовать на адекватность и провести предметный анализ модели.

Получаемые с помощью предложенного метода модели загрязнения могут иметь ряд недостатков, связанных с недостатками переменных-предикторов. Такие недостатки выявляются уже в процессе создания моделей загрязнения. Выявленные недостатки корректируются, что отражается (улучшает) на качестве модели.

Для оценки адекватности полученных моделей, в дополнение к традиционным способам, используется проверка модели на второй серии натурных измерений загрязняющих веществ (независимые измерения, которые не использовались при построении модели). Также предложен новый способ оценки влияния ошибок инструментальных измерений на качество окончательной математической модели загрязнения. Такой подход открывает возможность оценки устойчивости не только регрессионной модели в целом, но и каждого члена регрессии.

**В третьей главе** на примере г. Екатеринбург представлена методика построения модели загрязнения атмосферного воздуха мегаполиса (сеть автомобильных дорог среди городской застройки) методом регрессионной картографии, описанным в главе 2: проведен анализ источников загрязнения, по геоинформационной модели города рассчитаны переменные-предикторы, проведены инструментальные измерения, выполнен статистический анализ полученных данных.

Для модели загрязнения атмосферного воздуха г.Екатеринбург были проведены две серии измерений концентраций  $\text{NO}_2$ , первая – для создания модели, вторая – для проверки ее адекватности. Измерения в обоих случаях проводились в 80-ти точках города.

Была создана геоинформационная модель г.Екатеринбург – база географических данных, с включенной в нее информацией о распределении автомобильных дорог, географическом описании различных типов землепользования, топографических параметров местности и др. На ее основе были вычислены переменные-предикторы, описывающие уровни загрязнения в местах измерений.

После проведения измерительной кампании и определения переменных-предикторов был проведен статистический анализ полученной информации. Анализ полученных данных начинался с двухфакторного анализа. В большинстве случаев направленность связи между концентрацией  $\text{NO}_2$  и предиктором (знак коэффициента корреляции) соответствовала предметному смыслу, например, концентрация  $\text{NO}_2$  уменьшалась с увеличением расстояния от точки наблюдения до дороги R1 (Dist\_R1,  $r = -0,68$ ), с увеличением площади растительности (Veg\_100,  $r = -0,47$ ) и т.п. Для наиболее значимых переменных были изучены диаграммы рассеяния (например, рис.2).

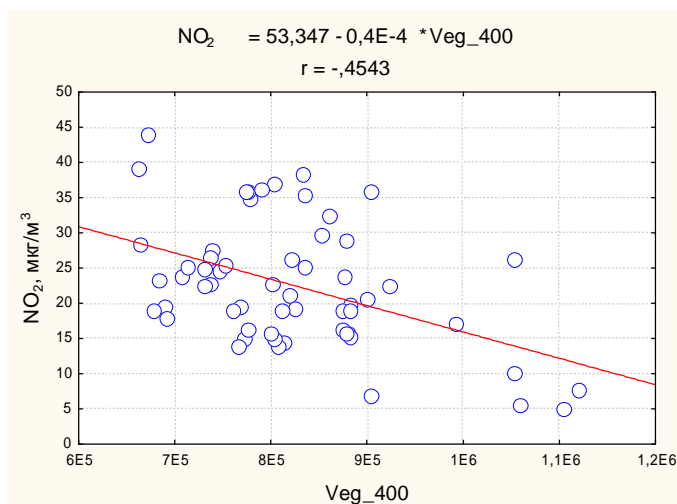


Рис. 2. Диаграмма рассеяния: Индекс NDVI, усредненный в радиусе 400м и концентрация  $\text{NO}_2$

Следующий шаг исследования – создание новой модели переменной *Road*. Для создания *Road* использовался комбинаторный алгоритм МГУА – полный перебор вариантов. Первоначальное число вариантов перебора переменных равно 255. Среди них обнаружено 14 регрессионных моделей, коэффициенты регрессии которых не противоречили предметному смыслу (см.выше). Семь из 14 моделей удовлетворяли критерию значимости вклада переменных. Среди них оптимальной моделью *Road* оказалась модель, имеющая максимальное значение критерия регулярности (критерий рассчитывался с помощью результатов второй серии измерений):

$$\text{Road} = 21,0 - 0,0120 * [\text{Dist\_R1}] + 0,0766 * [\text{R1\_050m}] + 0,00421 * [\text{R1\_200m}] + 0,00241 * [\text{R2\_050m}] + 0,00371 * [\text{R2\_200m}], \quad (1)$$

где Dist\_R1 – расстояние до дорог R1, R1\_050m – плотность дорог R1 в радиусе 50м вокруг точки наблюдения, R2\_050m – плотность дорог R2 в радиусе 50м и т.д.

Кроме прямого результата – создания интегральной переменной *Road*, описывающей связь плотности дорог города с загрязнителями воздуха, использование переменной *Road* позволяет получить дополнительный результат – возможность создавать и анализировать профиль моделируемых концентраций загрязняющих веществ вокруг гипотетической «усредненной» дороги города.

Полученные экспериментальные данные и расчетные плотности дорог позволяют выделить одномерную зависимость концентрации загрязняющего вещества от расстояния до дороги. На рис. 3 приведен профиль рассчитанных по (1) концентраций  $\text{NO}_2$ , представленный в виде зависимости от расстояния до дороги R1 (в условных единицах: 0 – отсутствие влияния дорог на концентрацию  $\text{NO}_2$ , 1 – максимальное влияние).

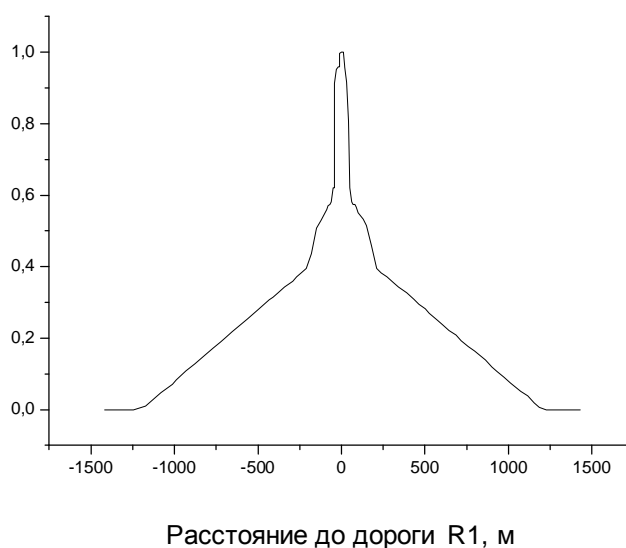


Рис. 3. Профиль загрязнения воздуха вокруг дороги R1 – уравнение (1)

После введения новой переменной *Road*, модели загрязнения атмосферного воздуха диоксидом азота строились с помощью метода пошаговой регрессии в виде:

$$[\text{NO}_2] = b_0 + b_1 * \text{Road} + b_2 * X_2 + \dots + b_k * X_k, \quad (2)$$

где  $X_2, X_3, \dots$  – остальные заранее рассчитанные по геоинформационной модели города переменные. Было построено несколько моделей с различными наборами переменных. Полученные варианты моделей и входящие в них переменные анализировались с предметной точки зрения, для чего были построены карты загрязнения по регрессионным уравнениям.

Затем была проведена ручная коррекция изображения NDVI, исправлены явные ошибки модели дорожно-транспортной сети города и т.п. После изучения ошибок модели были скорректированы переменные-предикторы и заново проведен регрессионный анализ, получены скорректированные коэффициенты регрессионных моделей  $\text{NO}_2$ . Итоговым вариантом модели (после анализа результатов второй серии

измерений) было выбрано уравнение регрессии (3), в котором содержится только две переменных: *Road* – влияние дорожной сети города, *Veg\_400* – оценка растительности и одновременно оценка плотности застройки:

$$[\text{NO}_2] = 16,72 + 0,897 * [\text{Road}] - 0,0267 * [\text{Veg\_400}] . \quad (3)$$

Полученная регрессионная модель (3) использована для создания карты загрязнения атмосферного воздуха диоксидом азота в г.Екатеринбург (рис. 4).

Качество построенной модели (3) достаточно высокое (коэффициент детерминации  $R^2 = 0,69$ ;  $p < 0,0001$ ); средняя величина индивидуальных ошибок полученной регрессионной модели составляет  $3,9 \text{ мкг/м}^3$  (менее 10% от ПДКсс).

Выполнена проверка соответствия статистического распределения остатков (индивидуальных ошибок) ожидаемому нормальному закону распределения. Согласно критерию Колмогорова-Смирнова (K-S:  $d=0,09580$ ;  $p > 0,20$ ) распределение остатков не противоречит гипотезе о распределении по нормальному закону. Остатки модели являются случайными – не обнаружено статистически значимых зависимостей от места измерения загрязнения или от значений входящих в модель загрязнения переменных.

Проведена вторая серия измерений концентраций  $\text{NO}_2$ , которая подтвердила адекватность модели. Полученные высокие коэффициенты корреляции рассчитанных по модели (3) значений  $\text{NO}_2$  с измеренными концентрациями (для первого этапа измерений  $r = 0,83$ , для второго этапа измерений  $r = 0,86$ ), а также совпадение коэффициентов значимых переменных-предикторов для двух серий измерений являются подтверждением устойчивости модели загрязнения.

Ряд численных расчетов проведен для оценки влияния погрешности измерений на результаты моделирования (погрешность метода измерений  $\text{NO}_2$  по данным производителя пассивных пробоотборников *Palms* составляет порядка 30%). Поскольку инструментальная погрешность является неустранимой, проводились расчеты параметров моделей при искусственном внесении *дополнительной* погрешности в значения  $\text{NO}_2$ ; в результате получена зависимость качества модели (показатель  $R^2$ ) от величины дополнительной погрешности. Экстраполировав полученную зависимость, можно оценить качество модели загрязнения в случае

нулевой погрешности измерений; значение коэффициента детерминации оказалось равным  $R^2 = 0,85$  (при 30%-ой начальной погрешности  $R^2$  равнялся 0,69).



Рис. 4. Карта загрязнения атмосферного воздуха диоксидом азота г.Екатеринбург

В ходе численных экспериментов был сделан вывод об устойчивости модели в целом, а также устойчивости составляющих ее переменных (даже при значительных величинах дополнительной ошибки в значениях  $NO_2$ , коэффициент регрессионного уравнения  $B_{Road}$  у переменной  $Road$  изменялся в узких пределах: от 0,89 до 0,97).

Методом регрессионной картографии были проведены оценки уровней загрязнения в каждой необходимой для эпидемиологического исследования точке города: определен уровень загрязнения воздуха для каждого из 25 ДООУ, а также для 1150 мест проживания участников исследования. На основе собранных данных для каждого участника был рассчитан важнейший показатель, который определяет влияния загрязнения воздуха на здоровье – персональная экспозиция.

**Четвертая глава** посвящена созданию модели загрязнения атмосферного воздуха промышленного центра на примере г. Сухой Лог. Приведен результат применения метода регрессионной картографии в условиях промышленного центра, когда загрязнение воздуха сформировано двумя источниками: промышленными предприятиями города и автотранспортом.

В г. Сухой Лог были проведены измерения концентраций взвешенных аэрозольных частиц для создания модели загрязнения воздуха (измерения в стандартах  $PM_{10}$ ,  $PM_4$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $PM_1$ , а также содержание общей пыли). Для измерений согласно разработанному алгоритму определения мест измерений были выбраны 40 точек на территории города.

Также как и для г.Екатеринбург, для г. Сухой Лог была создана геоинформационная модель города и вычислены переменные-предикторы, описывающие места измерений. Характерными для г. Сухой Лог стали переменные, описывающие грунтовые дороги и переменные для описания плотности добывающих карьеров – значительные для данного города источники аэрозольных частиц (в этом состоит отличие набора переменных для модели мегаполиса и модели промышленной зоны). Также в качестве одной из переменных использовалась карта загрязнения воздуха предприятиями Сухого Лога, полученная расчетным методом с помощью программного комплекса «Эколог». Всего было рассчитано 62 различных переменных.

Статистический анализ полученной информации для г. Сухой Лог был проведен аналогично исследованию загрязнения атмосферного воздуха в г.Екатеринбург. Созданная интегральная переменная *Road* – уравнение (4) – содержит переменные, описывающие грунтовые дороги, чего не было в модели мегаполиса:

$$Road = \text{Exp}(-3,56 + 0,145*[R1\_050m] + 0,122*[R1\_500m] + 0,0227*[R2\_050m] + 0,169*[R2\_500m] + 0,455*[R\_Dust\_050m] + 1,29*[R\_Dust\_500m]),$$

(4)

где  $R1\_050m$  – плотность дорог R1 в радиусе 50м вокруг точки наблюдения,  $R\_Dust\_050m$  – плотность грунтовых дорог в радиусе 50м и т.д.

Методом пошаговой регрессии были определены остальные переменные, имеющие взаимосвязь с концентрацией пыли:  $Quarry\_100$  – добывающих карьеров,  $Industrial\_300$  – промышленных предприятий,  $Buildings\_100$  – плотности застройки города. В результате построена модель для описания загрязнения атмосферного воздуха взвешенными аэрозольными частицами для г.Сухой Лог (пример промышленной зоны):

$$PM_{2.5\_v2} = 0,00248 + 0,927266*[Road] + 0,115*[Quarry\_100] + 0,047*[Industrial\_300] + 0,042*[Buildings\_100] .$$

(5)

В модель (5) входят 4 переменные:  $Road$  – влияние автотранспорта на загрязнение воздуха,  $Quarry\_100$  – добывающих карьеров,  $Industrial\_300$  – промышленных предприятий,  $Buildings\_100$  – плотности застройки города.

Предложенная регрессионная модель для описания загрязнения г. Сухой Лог взвешенными аэрозольными частицами (рис. 5) обладает высоким качеством (коэффициент детерминации  $R^2 = 0,78$ ) и высоким пространственным разрешением (15 м).

С помощью полученных данных было проведено сравнение результатов описания загрязнения тремя различными методами: методом регрессионной картографии, методом LUR и расчетным методом по методике ОНД-86, реализованной в программном комплексе «Эколог». В работе подробно описаны основные отличия результатов моделирования данными методами. Разработанный метод регрессионной картографии обладает преимуществами: имеет более точное описание распределения концентраций по территории города, описывает имеющиеся вторичное пыление в городе, лучше описывает распределение концентраций вокруг автомобильных дорог.

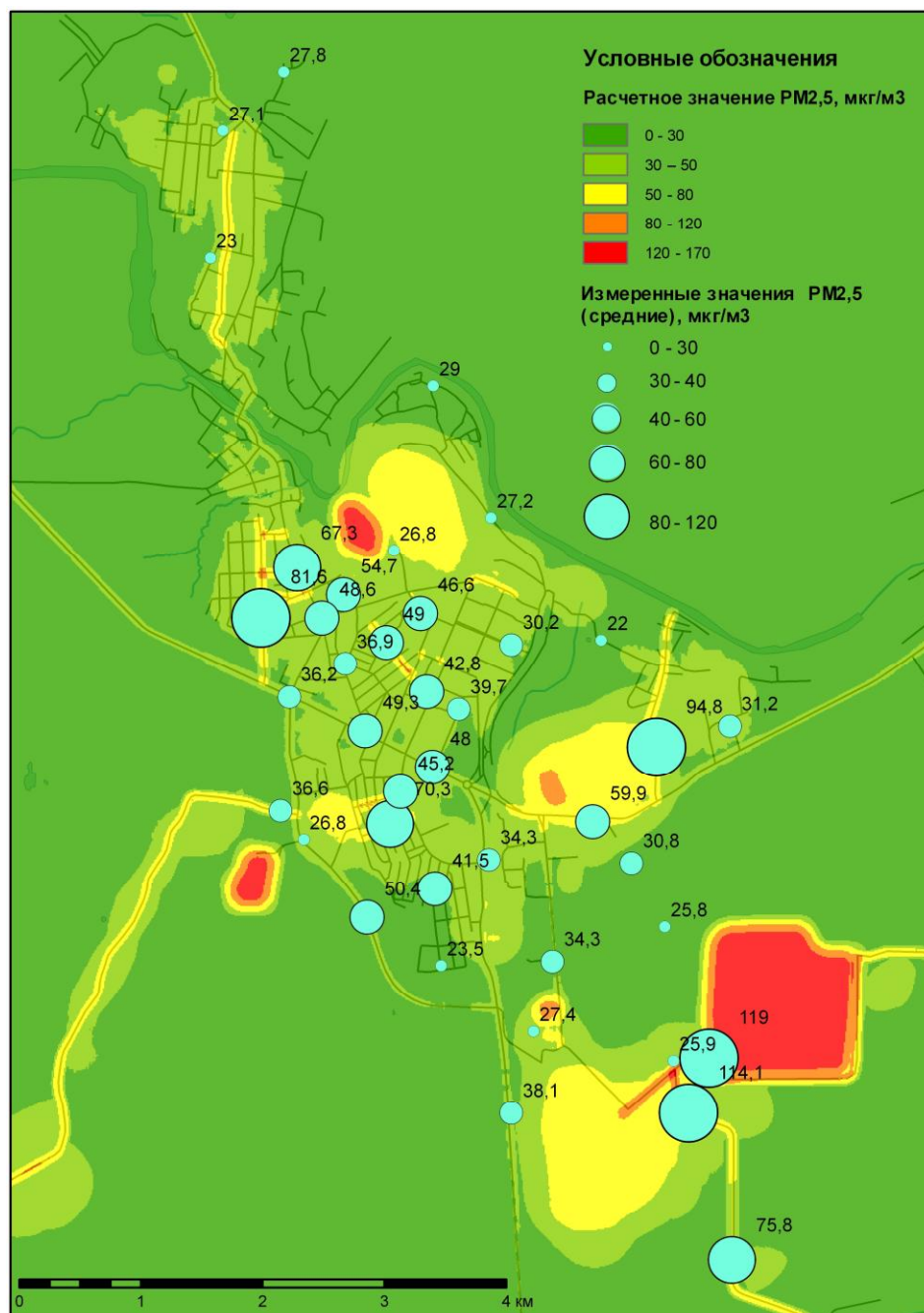


Рис.5. Карта загрязнения PM<sub>2.5</sub> г.Сухой Лог и измеренные значения концентраций PM<sub>2.5</sub>

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Разработан метод регрессионной картографии – новый метод построения математических моделей загрязнения атмосферного воздуха. Метод заключается в построении регрессионных моделей загрязнения воздуха на основе экспериментальных данных о загрязнении и доступной географической информации. Предложенный метод позволяет создавать модели для описания

пространственного распределения загрязнения атмосферного воздуха мегаполиса (выбросы автотранспорта) и промышленного центра (выбросы автотранспорта и промышленных предприятий). Данные модели обладают высоким качеством: пространственное разрешение порядка 15м, коэффициент детерминации 70-80%.

2. Для построения моделей загрязнения атмосферного воздуха предложено использовать следующие открытые источники географических данных: 1- картографические данные «OpenStreetMap», 2-спутниковые снимки LandSat, 3-высотные данные SRTM. На их основе создан набор необходимых для моделирования географических переменных и разработан способ их обработки. Предложен новый тип исходной информации для моделирования – данные иных систем моделирования (расчетные модели и методы интерполяции). Использование предложенных переменных для описания загрязнения атмосферного воздуха позволяет получать модели загрязнения атмосферного воздуха высокого качества.

3. Для описания вклада автотранспорта в загрязнение атмосферного воздуха городов предложен способ создания новой интегральной переменной *Road*, лучше всего с предметной точки зрения описывающей влияние дорог на концентрацию загрязнителей. Эта переменная формируется как взвешенная сумма нескольких первичных переменных (отобранных методом группового учета аргументов), описывающих дорожную сеть города, и, в дальнейшем, заменяет собой все эти переменные. Применение переменной *Road* позволяет не только повысить качество описания распределения загрязняющих веществ по территории мегаполиса, но также получить новые данные об объекте исследования, например, усредненный профиль загрязнения вокруг автомобильных дорог. В отличие от подобных описаний другими методами, предложенный способ соответствует реально наблюдаемой картине загрязнения.

4. Для проверки адекватности полученных математических моделей, в дополнение к традиционным способам проверки, предложены два новых элемента: проведение второй серии инструментальных измерений загрязняющих веществ и численные эксперименты с дополнительной инструментальной погрешностью.

Численные эксперименты заключались в искусственном внесении в исходные данные дополнительной погрешности и оценке влияния погрешности на качество модели загрязнения. Результаты позволяют прогнозировать качество модели при отсутствии инструментальных ошибок; побочный результат этих численных экспериментов – дополнительная проверка устойчивости модели.

5. Создана модель загрязнения воздуха *мегаполиса* – города с большой численностью населения, где преобладающим источником загрязнения является автотранспорт. Показано, что для построения модели загрязнения воздуха (любого) мегаполиса необходимо всего две объясняющие переменные: *Road* и *Veg*. Наиболее значимой переменной модели является переменная *Road*, использование которой позволяет отобразить на карте загрязнения сложный профиль распределения загрязнения непосредственно вокруг загруженных автотранспортом дорог. Второй по значимости переменной модели является переменная *Veg*; эта переменная, созданная на основе спутниковых снимков LandSat как показатель распределения растительности, в нашей модели получила другой предметный смысл – переменная отражает зависимость концентрации загрязнителей от плотности городской застройки. С помощью данной модели была создана карта загрязнения г. Екатеринбург диоксидом азота (коэффициент детерминации около 70%).

6. Создана модель загрязнения *промышленного центра*, в котором значительный вклад в загрязнение воздуха вносят промышленные предприятия. Показано, что для описания поля концентраций загрязняющих веществ в промышленном центре необходимы объясняющие переменные, описывающие: 1-распределение автомобильных дорог города; 2-влияние плотности застройки города; 3-распределение промышленных предприятий; 4-карьеры открытого типа (для г. Сухой Лог). С помощью данной модели была создана карта загрязнения г. Сухой Лог взвешенными аэрозольными частицами (коэффициент детерминации более 70%).

7. Выполнено сравнение метода регрессионной картографии с другими методами описания загрязнения воздуха. Показаны явные преимущества нового

метода по сравнению с расчетными моделями (ПО «Эколог», ОНД-86), с методом интерполяции (Кригинг) и с традиционным методом-прототипом Land Use Regression.

8. В результате анализа двух серий измерения концентраций  $\text{NO}_2$  в г.Екатеринбурге показано, что относительные величины концентраций одинаковы во время первой и второй серии измерений, проведенных с интервалом 3 месяца. Таким образом, установлено постоянство *картины* пространственного распределения  $\text{NO}_2$  в г. Екатеринбург во времени.

9. Для моделирования загрязнения воздуха методом регрессионной картографии создан комплекс программ, расширяющих возможности стандартного ПО данной области (программа StatSoft STATISTICA для статистической обработки данных, ERSI ArcGIS для обработки географической информации). Разработанный программный комплекс включает:

- Модуль автоматизированного расчета переменных модели для ПО ERSI ArcGIS.
- Программа формирования адекватной модели *интегральной* переменной *Road* для StatSoft STATISTICA. В программе реализован комбинаторный алгоритм метода группового учета аргументов (перебор всех вариантов).
- Программа автоматизированной проверки адекватности модели загрязнения атмосферного воздуха.
- Программа для создания карты загрязнения. Программа формирует пространственное распределение моделируемого вещества для всей территории исследуемого города по созданной регрессионной модели загрязнения воздуха. Полученная карта отражает влияние всех значимых источников загрязнения и обладает пространственным разрешением порядка 15 м.

10. Практический результат работы: на основе полученной математической модели загрязнения воздуха для участников эпидемиологического исследования рассчитан важнейший показатель, который определяет влияния загрязнения воздуха на здоровье населения – персональная экспозиция (для 25 детских дошкольных учреждений Екатеринбурга и для 1150 мест проживания участников исследования).

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

Публикации в журналах из списка ВАК:

1. Антропов К.М., Казмер Ю.И., Вараксин А.Н. Описание пространственного распределения загрязнения атмосферного воздуха промышленного центра методом Land Use Regression (обзор) // Экологические системы и приборы (Москва), 2010, № 1. С. 28-41

2. Антропов К.М., Вараксин А.Н. Оценка загрязнения атмосферного воздуха г.Екатеринбурга диоксидом азота методом Land Use Regression // Экологические системы и приборы (Москва), 2011. № 8. С.47-54.

3. Антропов К.М., Вараксин А.Н. Взаимосвязь здоровья детей г. Екатеринбурга с показателями загрязнения окружающей среды и другими факторами риска // Экологические системы и приборы (Москва), 2011, № 5. С. 26-30.

4. Антропов К.М., Казмер Ю.И. Влияние загрязнения окружающей среды на здоровье детей // Вестник Уральской медицинской академической науки (Екатеринбург), 2009, № 2. С. 130-131.

5. Шилко В.И., Антропов К.М., Зеленцова В.Л., Архипова М.М., Николина Е.В. К характеристике показателей здоровья детей перед поступлением в школу // Уральский медицинский журнал (Екатеринбург), 2011, № 7. С. 23-28.

Остальные публикации:

6. Антропов К.М., Вараксин А.Н. Использование регрессионного анализа для моделирования загрязнения воздушного бассейна крупного промышленного города // Материалы V международной конференции «Экологические и гидрометеорологические проблемы больших городов и промышленных зон». СПб, 2009. С. 80-81.

7. Антропов К.М. Пространственное распределение выбросов автотранспорта в крупных промышленных городах // Сборник трудов III Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы развития современной науки, техники и технологий». Москва, 2011. С. 11-17.

---

Подписано в печать	.01.2012	Формат 60×84 1/16	Бумага	писчая.
Плоская печать		Тираж 100 экз.	Заказ	

---

Ризография НИЧ УрФУ  
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19