

## ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ТЕНДЕНЦИЙ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЕЙ

**Фатеева Ю.Г., Легович Ю.С., Ефремов А.Ю., Гончаренко В.И.**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*

*jfateeva@ipu.ru, legov@ipu.ru, andre@ipu.ru, vladimirgonch@mail.ru*

*Аннотация: Доклад посвящен анализу существующих методов сбора данных и оценке перспективных тенденций создания геоинформационных карт загрязнения атмосферного воздуха. Предложен метод поиска источника загрязнения атмосферного воздуха с помощью разработанного мобильного приложения на основе гео-ориентированной социальной сети и беспилотных летательных аппаратов.*

Ключевые слова: экологический мониторинг, обнаружение источника загрязнения, карты загрязнения воздуха, беспроводная сенсорная сеть, общественная сенсорная сеть, краудсорсинг, мобильное приложение, беспилотные летательные аппараты.

### **Введение**

Загрязнение атмосферного воздуха сегодня является серьезной проблемой во многих развивающихся странах.

В связи с возрастающей антропогенной нагрузкой на окружающую среду оценка состояния ее компонентов на урбанизированных территориях, сохранение и обеспечение качества окружающей среды в целях улучшения здоровья населения входят в приоритетные задачи развития большинства государств, в том числе и России. Загрязнение воздуха было признано девятым по величине фактором риска для здоровья живых организмов во всем мире [1].

По данным Всемирной Организации Здравоохранения (ВОЗ) в 2016 году загрязнение атмосферного воздуха в городах и сельских районах привело к 4,2 миллиону случаев преждевременной смерти в мире [2].

Повышение осведомленности общественности о загрязнении окружающего воздуха может повысить уровень жизни каждого отдельно взятого индивидуума и помочь принять надлежащие меры в соответствии с личными потребностями (выбрать наиболее чистый район для жизни и воспитания детей, занятий спортом на воздухе, прогулок и т.д.).

Для осуществления такой осведомленности необходимо создать условия для непрерывного сбора и анализа данных о состоянии воздуха с высоким временным и пространственным разрешением. На основе получаемых данных необходимо строить карты и модели прогнозирования

загрязнения, которые удобно интегрировать с алгоритмами поиска источников загрязнения воздуха с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

Данное исследование посвящено поиску эффективного метода мониторинга динамических изменений качества воздуха в крупных городах путем анализа пространственно-временных тенденций в гео-ориентированных сообщениях на разработанной платформе мобильного приложения CheckAir и его интеграцию с существующими алгоритмами поиска источников загрязнения воздуха с помощью беспилотных летательных аппаратов.

## 1 Существующие методы сбора данных о загрязнении атмосферного воздуха

### 1.1 Станции экологического мониторинга

Для непрерывного анализа состояния атмосферного воздуха в городах обычно используются широкие сети автоматических стационарных и мобильных станций контроля загрязнения атмосферного воздуха, передвижные лаборатории и лабораторные базы. Именно от них в основном и поступают данные о чрезвычайных происшествиях и случаях аварийных выбросов загрязняющих атмосферу веществ.

По данным мирового агентства мониторинга качества воздуха (World-wide Air Quality Monitoring Data Coverage) сейчас насчитывают более 20000 станций экологического мониторинга, предоставляющих информацию о загрязнении атмосферного воздуха по всему миру [3]. Эти станции мониторинга являются высоконадежными, точными и способны измерять широкий спектр загрязняющих веществ [4].

Основными же недостатками таких контрольных станций являются их габариты, вес, дороговизна самого оборудования и его обслуживания. Исследования [5] показывают, что радиус распространения загрязняющих веществ может варьироваться от нескольких метров до нескольких километров, а временной интервал изменения ситуации может занимать от нескольких минут до суток. В таких ситуациях традиционные стационарные станции системы мониторинга не всегда способны обнаружить повышенную концентрацию опасных веществ из-за недостаточной плотности своего размещения и сложности масштабируемости.

Примером может служить Московская система мониторинга атмосферного воздуха (Мосэкомониторинг), которая является одной из лучших в Европе. Она включает в себя 56 автоматических станций контроля загрязнения атмосферы, мобильные автоматические станции, передвижные лаборатории и лабораторные базы. Однако даже такая развитая сеть системы контроля качества воздуха не всегда в состоянии зафиксировать превышение предельно допустимой концентрации (ПДК), не говоря уже о поиске источника загрязнения. Примером может послужить неизменная ситуация участившихся случаев фиксации человеком запаха сероводорода (H<sub>2</sub>S) в различных частях города Москвы. Но при этом станции экологического мониторинга либо не фиксируют превышение ПДК, либо не удается найти источник выбросов.

H<sub>2</sub>S вещество класса опасности – 2. Очень токсичный газ, действующий непосредственно на нервную систему человека. Максимальная разовая предельно допустимая концентрация в воздухе – 0,008 мг/м<sup>3</sup>. Вдыхание воздуха с небольшим содержанием сероводорода вызывает головокружение, головную боль и тошноту, а со значительной концентрацией приводит к судорогам, отёку лёгких, коме и летальному исходу. При вдыхании воздуха с небольшой концентрацией у человека довольно быстро возникает адаптация к запаху, а при большой концентрации возникает паралич обонятельного нерва, и запах сероводорода почти сразу перестает ощущаться [6].

Для сравнения – в Пекине (Китай) 35 станций экологического мониторинга, в Гонконге (Китай) – 15, в Нью-Йорке (США) – 44, а в Лондоне (Великобритания) – 123. Такое низкое пространственное разрешение является достаточным для мониторинга ситуации по городу в целом, но крайне недостаточно для точного картографирования загрязнения окружающего воздуха.

### 1.2 Беспроводные сенсорные сети

В настоящее время данные о загрязнении воздуха в местах, где отсутствуют станции мониторинга, получаются с помощью математических моделей или оценок качества воздуха [7].

В то же время с каждым годом растет число портативных недорогих датчиков измерения загрязнения окружающего воздуха. Они обладают небольшими размерами, быстрым временем отклика (от нескольких секунд до минуты) и невысокой стоимостью. Однако ни один из портативных датчиков не может обеспечить такое же качество получаемых данных, как стационарные станции экологического мониторинга [8]. В то же время их повсеместное

использование позволяет увеличить пространственно-временное разрешение получаемых данных о состоянии окружающей среды. И на основе получаемых данных строить точные геоинформационные карты и модели загрязнения воздуха. Поэтому исследователи в последние годы активно развивают Систему мониторинга загрязнения воздуха следующего поколения (TNGAPMS), объединяя недорогие портативные измерительные датчики в беспроводную сенсорную сеть (WSN). Портативные датчики обеспечивают мобильность и возможность крупномасштабного развертывания узлов беспроводной сети WSN, позволяя получать данные в реальном времени [9]. Пространственное и временное разрешение получаемой информации о загрязнении окружающей среды в Системах мониторинга нового поколения (TNGAPMS) значительно больше, чем в традиционных системах мониторинга. TNGAPMS также помогает исследователям более эффективно и точно исследовать распределение уровня загрязнения воздуха, строить модели оценки качества воздуха и прогнозирования [7].

Существующие беспроводные сенсорные сети (WSN) можно разделить на три категории по типу несущих сенсорных узлов: сеть статических датчиков (SSN), общественная сенсорная сеть (CSN) и сеть датчиков на транспортных средствах (VSN) [10].

### 1.2.1 Сеть статических датчиков

Сенсорные узлы в таких сетях обычно устанавливаются на столбах уличных фонарей, светофорах или в тщательно отобранных местах. Использование недорогих портативных датчиков, объединенных беспроводной сетью WSN, несомненно обладает рядом преимуществ. Во-первых, из-за того, что узел датчиков часто размещается в местах, способных выдерживать достаточные нагрузки, он может интегрироваться со вспомогательными инструментами, и тем самым обеспечить сбор большего количества высокоточных и надежных данных. Стационарность сенсорного узла обеспечивает точно заданные координаты и доступ к периодической калибровке и профессиональному обслуживанию. Также каждому узлу сети гарантированно сетевое подключение и постоянный доступ к электросети.

Однако, у статической сети датчиков есть и ряд недостатков, которые надо учитывать. Для обеспечения высокого пространственно-временного разрешения собираемых данных необходимо постоянно увеличивающееся количество сенсорных узлов, которые в свою очередь требуют большой ресурс на настройку оборудования, калибровку и постоянное обслуживание.

### 1.2.2 Общественная сенсорная сеть

В системах совместного участия датчики обычно переносятся пользователями. В такой сети используются недорогие портативные датчики окружающей среды и смартфоны. Пользователи могут получать, анализировать и обмениваться локальной информацией о загрязнении воздуха [11]. Существенным преимуществом создания карты загрязнения окружающего воздуха с помощью такой сети является ее экономическая эффективность, так как узел датчика использует модуль GPS смартфона, сотовую сеть и вычислительную мощность самого мобильного устройства. Потенциально возможна очень высокая плотность покрытия узлами общественной сети, с учетом пользователей смартфонов. Стоимость узлов датчиков и передачи данных может быть пропорционально распределена между пользователями по доступным каждому участнику ресурсам. Также большим преимуществом является мобильность сенсорных узлов, что позволяет увеличивать географический охват одного сенсорного узла. Однако существенным недостатком такой сети является низкая точность и надежность данных [12]. Кроме того, используемые датчики также являются по большей части практически не откалиброванными и плохо обслуживаемыми. А пользователи большую часть времени проводят в помещениях. Также серьезные ограничения накладывает потребление энергии, ведь, как правило, сенсорные узлы питаются от батарей малой емкости. Носимые датчики в том числе накладывают серьезные ограничения по весу и размеру.

### 1.2.3 Сеть датчиков транспортных средств

В таких системах датчики крепятся к автомобильному транспортному средству, благодаря чему один узел датчиков может обеспечивать широкий географический охват [13]. Несомненным преимуществом такой сети является свободное электропотребление, т.к. датчики питаются от аккумуляторов автомобилей. Вес и количество используемых на узле датчиков может намного превышать те, которые использует общественная сенсорная сеть. Но очевидным минусом является проблема с отбором проб воздуха, на которую влияет само транспортное средство.

## 2 Применение гео-ориентированных социальных сетей для экологического мониторинга

### 2.1 Тенденции использования социальных сетей для экологического мониторинга

В последнее время все большую популярность набирают аналитические системы социальных сетей для анализа данных и прогнозирования различных ситуаций, в том числе это касается и экологической обстановки в окружающем нас мире.

В Японии исследователи обнаружили, что внезапное увеличение активности микроблогов может быть использовано для обнаружения подземных толчков в режиме реального времени [14,15] Эти исследования показывают, что сообщения социальных сетей в киберпространстве могут быть использованы для изучения проблемы в реальном мире.

Как показывают исследования [16], проведенные в 2015 году в КНР, мониторинг загрязнения окружающего воздуха возможно осуществлять, анализируя реакцию жителей городов в социальных сетях. Каждый владелец мобильного телефона в этом случае выступает «социальным датчиком», который улавливает любые ощутимые изменения в окружающем его пространстве и делиться этой информацией в своих социальных сетях. Корреляционный анализ подобных систем используется для сравнения связей между тенденциями обсуждения в сообщениях социальных сетей и временными изменениями индексом качества воздуха – AQI.

Сбор анализируемой в представленной системе информации осуществляется из ретвит-сообщений, сообщений в тематических мобильных приложениях и из отдельных оригинальных сообщений.

Многие люди устанавливают мобильные приложения загрязнения воздуха на свои мобильные телефоны. Эти приложения транслируют обновления о загрязнении воздуха каждые несколько часов и позволяют пользователям публиковать эти обновления непосредственно в своих социальных сетях. Обновления, содержащие очень хорошую или плохую информацию о качестве воздуха, побуждают пользователей публиковать эти обновления в своих социальных сетях.

Как показывает исследование [16], коэффициент корреляции Пирсона между AQI и сообщениями из мобильных приложений о загрязнении воздуха в течение 12 месяцев был выше 0,6. Когда уровень качества воздуха, о которых сообщалось в этих сообщениях, был высоким, все больше людей размещали эту информацию в своих социальных сетях. И таким образом, когда AQI увеличился, частота сообщений о загрязнении через мобильные приложения также увеличивалась. Таким образом, сообщения приложений о загрязнении, как индикатор общественного восприятия загрязнения воздуха, были тесно связаны с AQI и могли отражать динамику AQI. На рисунке 1 представлена высокая корреляция между AQI и сообщениями через мобильные приложения о загрязнении воздуха.

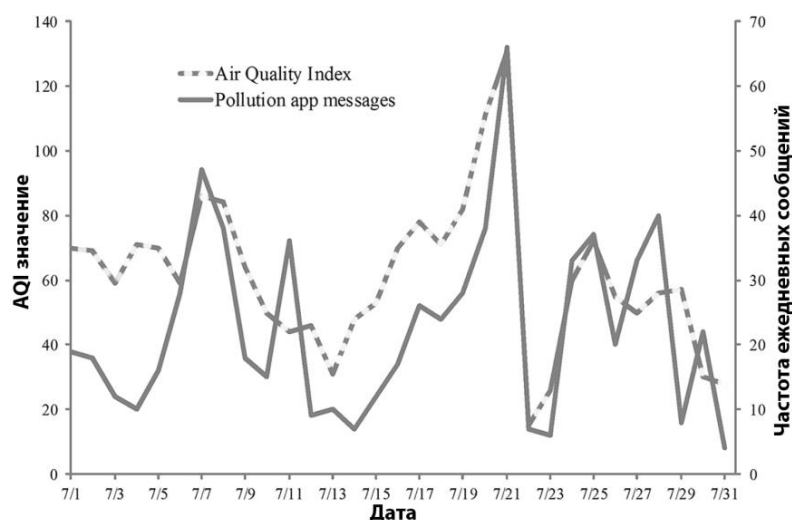


Рис. 1. Высокая корреляция между AQI и оповещениями через мобильные приложения [16]

### 2.2 Созданная мобильная платформа данных о загрязнении окружающего воздуха

Если говорить о мобильных приложениях, то в последнее время все большую популярность среди жителей городов набирают приложения, которые показывают агрегированные данные, получаемые со стационарных станций экологического мониторинга, сети портативных датчиков, а также спутников. Такие приложения не только агрегируют и предоставляют данные о состоянии загрязнения в режиме реального времени, но и используют алгоритмы прогнозирования изменения

ситуации. Существенным недостатком таких приложений является то, что они используют данные с тех же станций, которые зачастую не фиксируют наличие превышения предельно допустимых концентраций химических веществ.

Одними из самых популярных мобильных приложений являются: израильский проект BreezoMeter, дающий не только данные об экологической ситуации того места, где находится пользователь, но и персональные рекомендации по сохранению здоровья, и AirVisual - приложение, разработанное швейцарской компанией, выпускающей малогабаритные портативные станции мониторинга.

Каждое из этих приложений обладает широким функционалом, но не дает возможности пользователям для быстрой обратной связи.

Разработанное нами мобильное приложение CheckAir позволяет жителям городов не только получать данные о локальной экологической ситуации, но и самим выступить в роли сети датчиков. Каждый пользователь мобильного приложения CheckAir – условный сенсор, который может отправить данных о превышении концентрации химических веществ в воздухе, которые можно распознать с помощью органов обоняния. Простым примером таких веществ являются: газ сероводород (H<sub>2</sub>S), аммиак (NH<sub>3</sub>), природный газ вблизи жилых домов, бензолы и т.д.

Любой пользователь мобильного приложения получает возможность оповестить о локальной проблеме загрязнения воздуха в том месте, где он находится, путем занесения информации на карту, встроенную в мобильное приложение. Информация о загрязнении мгновенно появляется в базе данных и отображается в виде гео-тега на карте.

В ходе экспериментов, неоднократно было установлено, что данные, полученные от стационарных станций экологического мониторинга и данные, поступающие на мобильную платформу от людей о загрязнении окружающего воздуха, сильно отличаются, что служит сигналом для поиска источника загрязнения и более внимательного изучения районов загрязнения органами природоохраны.

Таким образом, CheckAir – это геоинформационная карта с высоким пространственно-временным разрешением проблемных зон. Используя данные такой «народной» карты загрязнения, легко вычисляется источник загрязнения вблизи явно проблемных зон - либо с помощью наземных мобильных станций экологического мониторинга, либо БПЛА, оснащенных газоанализаторами.

Основными функциями разработанного приложения являются: распознавание координат каждого пользователя с помощью встроенного модуля GPS, отображение координат пользователя на интерактивной карте, удобный интерфейс для внесения на карту информации о беспокоящем запахе химического вещества и оценка степени загрязнения. Таким образом, люди отмечают на карте те места, которые вызывают у них беспокойство о складывающейся экологической ситуации. Чем больше оповещений о локационном загрязнении, тем или иным химическим веществом, тем нагляднее выявляется проблемная зона, в которой необходимо найти источник химических выбросов.

Так же одной из основных функций мобильного приложения является оповещение пользователей при попадании их в зону загрязнения на основе данных карты. Таким образом, CheckAir - общественная сенсорная сеть, основанная на биологических сенсорах, которыми обладают люди. Эти сенсоры не требуют калибровки или дополнительного технического обслуживания. Так же благодаря поступающим данным система мониторинга имеет возможность быстро реагировать на реальные жалобы со стороны жителей тех или иных районов, минуя традиционную систему подачи заявлений в государственные органы контроля. Недостатком сбора данных с помощью такого приложения является то, что количество участников такой сети является плохо контролируемым ввиду своей неавтоматизированности и подверженности человеческому фактору. Поэтому необходимо интеграция получаемых данных с интерактивной карты CheckAir с данными, получаемыми из других источников экологического мониторинга.

### **3 Поиск источника загрязнения воздуха градиентным методом**

Обнаружение источника загрязнения воздуха до сих пор остаётся трудоемкой и длительной во времени задачей. Для обнаружения источника загрязнения воздуха последние годы всё чаще используются БПЛА с полезной нагрузкой в виде бортовых автоматических газоаналитических систем для непрерывного определения концентрации вредных примесей.

При интеграции БПЛА с гео-ориентированными социальными сетями (такими как CheckAir), агрегирующими данные от пользователей мобильных приложений и данных, получаемых из

открытых источников о состоянии окружающего воздуха, локационно становится очевидной координата начала поиска источника загрязнения.

В настоящее время существует множество работ, посвященных моделированию отслеживания шлейфа загрязнения воздуха с использованием БПЛА [17,18, 19]. Практически все они основаны на алгоритмах градиентного поиска, который требует как минимум двух пространственно разнесенных измерений, которые могут быть получены с использованием нескольких синхронизированных по времени БПЛА или двух датчиков на борту одного БПЛА или же с помощью нескольких измерений, разнесенных во времени и пространстве одним датчиком.

Градиентные методы поиска оптимальных решений обладают множеством преимуществ перед методами ненаправленного поиска, главное из которых заключается в резком сокращении количества вычислений для достижения экстремума. Суть градиентных методов заключается в вычислении градиента функции цели либо на каждом шаге движения к экстремуму, либо после серии шагов, определенных стратегией поиска:

$$(1) \quad \overrightarrow{grad}(y) = \vec{i} \frac{\partial y}{\partial x_1} + \vec{j} \frac{\partial y}{\partial x_2} + \dots + \vec{k} \frac{\partial y}{\partial x_n}$$

Градиент показывает направление наискорейшего подъема, а антиградиент, соответственно, спуска по поверхности отклика.

Ввиду того, что эффект распространения загрязнения воздуха в вертикальном направлении намного слабее, чем в горизонтальном [20], допустим переход от трехмерного поиска к двумерному. Благодаря чему достигается упрощение вычислений и эффективное уменьшение площади поиска.

Интерес представляет работа [21], в которой рассматривается комбинированный подход обнаружения источника загрязнения на основе градиентного поиска и вероятностного метода. БПЛА использует метод на основе градиента для отслеживания концентрации загрязняющего вещества, который дополняется поиском положения источника на основе вероятностной модели, представленной в [22], в которой используется байесовский метод для построения и обновления карты вероятностей местоположения источника загрязняющего вещества, с каждой новой доступной сенсорной информацией, пока БПЛА перемещается в окружающей среде.

В описываемом в работе [21] алгоритме первым шагом является создание представления карты загрязнения, разбитую по прямоугольным ячейкам.

Если источник является уникальным, то есть  $P(\alpha_i) = 1$ , где  $\alpha_i$  – вектор, который представляет возможное нахождение источника загрязнения в выбранной  $i$ -й ячейке.

$A_i$  – событие, когда источник находится в выбранной ячейке  $C_i$ , в тот самый момент, когда БПЛА находится в  $C_j$  и детектирует события  $D_j(t_q)$  в момент времени  $t_q$ .

$$(2). \quad P(A_i | B(t_{q-1}), D_j(t_q)) = M \alpha_i(t_{q-1}) \beta_{ij}(t_0, t_q)$$

$$(3) \quad P(A_i | B(t_{q-1}), \bar{D}_j(t_q)) = \frac{\alpha_i(t_{q-1}) \gamma_{ij}(t_0, t_q)^M}{\sum_{i=1}^M \gamma_{ij}(t_0, t_q)}$$
, где

$$(4) \quad B(t_{q-1}) = \{D_{j1}(t_{q-1}), \bar{D}_{j2}(t_{q-2}), \dots, D_{jq}(t_0)\}$$

$$(5) \quad \beta_{ij}(t_0, t_q) = \frac{1}{q} \sum_{i=0}^{q-1} S_{ij}(t_l, t_q)$$

$$(6) \quad \gamma_{ij}(t_0, t_q) = \prod_{i=0}^{q-1} [1 - \mu S_{ij}(t_l, t_q)]$$

$$(7) \quad S_{ij}(t_l, t_q) = \frac{e^{-\frac{(x_j - x_i - v_x(t_l, t_q))^2}{2(t_q - t_l)\sigma_x^2}} e^{-\frac{(x_j - x_i - v_z(t_l, t_q))^2}{2(t_q - t_l)\sigma_z^2}}}{2\pi(t_q - t_l)\sigma_x\sigma_z} L_x L_z \text{ и } (8) V(t_l, t_q) = \sum_{i=l}^{q-1} U(P_{uav}(t_i)) dt$$

где  $U(P_{uav}(t_i))$  представляет вектор ветра, измеренный БПЛА в момент времени  $t_i$  а  $\mu$  - вероятность обнаружения загрязняющего вещества в ячейке  $C_j$ , учитывая, что в этой ячейке имеется обнаруживаемое загрязняющее вещество.

Дальнейшие объяснения представлены в [22], включая выводы каждого уравнения и оптимизацию численной обработки.

Далее градиентный цикл обработки вычисляет позиции для перемещения БПЛА между точками на маршруте  $p_k$ . Для получения информации об изменении концентрации загрязнения воздуха между точками  $p_{k-1}$  и  $p_k$ , используется историческая информация  $\psi_k = \{\psi(t): p(t) \in (p_{k-1}, p_k)\}$ .

Эксперименты, представленные в работе [21], показывают достаточно точные результаты в поиске источника загрязнения представленным выше методом.

Как видно из приведенного выше алгоритма, проблему выявления точки отсчета для дальнейшего поиска локального максимума загрязнения воздуха, можно решить с помощью интеграции данных, получаемых из мобильного приложения CheckAir.

## Заключение

В данной работе был проведен обзор существующих способов сбора данных о загрязнении окружающего воздуха. Развивающаяся сеть беспроводных датчиков начинает играть важную роль в составлении геоинформационных карт загрязнения воздуха и служит весомым дополнением к высоконадежным и дорогим стационарным станциям экологического мониторинга. Также был предложен способ сбора данных об окружающем воздухе с помощью разработанного мобильного приложения CheckAir, которое позволяет собирать данные напрямую от пользователей мобильного приложения и дополнять геоинформационную карту, получаемую с помощью обработки данных из открытых интерфейсов прикладного программирования (API). Кроме того, была рассмотрена задача поиска источника загрязнения градиентным методом при помощи БПЛА. Отметим, что для многих алгоритмов очень важно определить начальную точку поиска, выбор которой как раз и может быть сделан с помощью данных, собираемых мобильным приложением CheckAir.

## Литература

1. *Lim S.S., Vos T., Flaxman A.D., Danaei G., Shibuya K., Adair-Rohani H., AlMazroa M.A., Amann M., Anderson H.R., Andrews K.G., et al.* A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990–2010: A systematic analysis for the global burden of disease study 2010. *Lancet*. 2012
2. World Health Organization Ambient (Outdoor) Air Quality and Health. [(accessed on 20 August 2015)]. Available online: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/en/>
3. World-wide Air Quality Monitoring Data Coverage. Available at <http://aqicn.org/sources/cn/>
4. *Amorim L.C.A., Carneiro J.P., Cardeal Z.L.* An optimized method for determination of benzene in exhaled air by gas chromatography-mass spectrometry using solid phase microextraction as a sampling technique. *J. Chromatogr. B*. 2008;865:141–146.
5. *Dobre A., Arnold S.J., Smalley R.J., Boddy J.W.D., Barlow J.F., Tomlin A.S., Belcher S.E.* Flow field measurements in the proximity of an urban intersection in London, UK. *Atmos. Environ.* 2005
6. *Беспмятов Г.П., Кротов Ю.А.* Предельно допустимые концентрации химических веществ в окружающей среде. Справочник. Химия. Л.: 1985 г. С. 66-67
7. *Bravo M.A., Fuentes M., Zhang Y., Burr M.J., Bell M.L.* Comparison of exposure estimation methods for air pollutants: Ambient monitoring data and regional air quality simulation. *Environ. Res.* 2012;116:1–10.
8. *Alexandre M., Gerboles M.* Review of Small Commercial Sensors for Indicative Monitoring of Ambient Gas. *Chem. Eng. Trans.* 2012. P.169–174.
9. *Ma Y., Richards M., Ghanem M., Guo Y., Hassard J.* Air Pollution Monitoring and Mining Based on Sensor Grid in London. *Sensors*. 2008
10. *Wei Ying Yi, Kin Ming Lo, Terrence Mak, Kwong Sak Leung,* A Survey of Wireless Sensor Network Based Air Pollution Monitoring Systems, *Sensors*, 2015
11. *Burke J.A., Estrin D., Hansen M., Parker A., Ramanathan N., Reddy S., Srivastava M.B.* Participatory sensing; Proceedings of the 4th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems (SenSys '06); Boulder, CO, USA. 1–3 November 2006. P. 1124–1127.
12. United States Environmental Protection Agency Buildings and their Impact on the Environment: A Statistical Summary. 2015 Available online:<http://www.epa.gov/greenbuilding/pubs/gbstats.pdf>
13. *Lo Re G., Peri D., Vassallo S.* Urban Air Quality Monitoring Using Vehicular Sensor Networks. In: *Gaglio S., Lo Re G., editors.* Advances onto the Internet of Things. Springer International Publishing; Gewerbestrasse, Switzerland: 2014
14. *Sakaki T., Okazaki M, Matsuo Y.* Earthquake shakes Twitter users: real-time event detection by social sensors. In: Proceedings of the 19th international conference on World wide web. North Carolina:Raleigh;2010. pp. 851–860.
15. *Yates D, Paquette S.* Emergency knowledge management and social media technologies: A case study of the 2010 Haitian earthquake. *International Journal of Information Management*. 2011;31(1):6–13
16. *Wei Jiang ,Yandong Wang ,Ming-Hsiang Tsou , Xiaokang Fu* Using Social Media to Detect Outdoor Air Pollution and Monitor Air Quality Index (AQI): A Geo-Targeted Spatiotemporal

- Analysis Framework with Sina Weibo (Chinese Twitter), 2015, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0141185>
17. *V. S. Midland and R. Hofman*, "Tracking of atmospheric release of pollution using unmanned aerial vehicles," *Atmospheric Environment*, vol. 67, pp. 425–436, 2013.
  18. *T. Egorova, M. A. Demetriou, and N. A. Gatsonis*, "Estimation of a gaseous release into the atmosphere using an unmanned aerial vehicle," in 2015 European Control Conference (ECC), Linz, Austria, July 2015, pp. 873–878.
  19. *N. A. Gatsonis, M. A. Demetriou, and T. Egorova*, "Real-time prediction of gas contaminant concentration from a ground intruder using a UAV," in 2015 IEEE International Symposium on Technologies for Homeland Security (HST), Waltham, MA, USA, April 2015, pp. 1–6.
  20. *A. Daly and P. Zannetti*, "Air pollution modeling— An overview," *Ambient air pollution*, pp. 15–28, 2007, <http://envirocomp.org/books/chapters/2aap.pdf>; (accessed 12.04.2018).
  21. *Noé Marcelo Yungaicela, Youmin Zhang, Luis E. Garza-Castañón*, Ismael Minchala UAV-based Air Pollutant Source Localization Using Gradient and Probabilistic Methods, 2018 International Conference on UAS (ICUAS), Dallas, TX, USA, June 12-15, 2018
  22. *S. Pang and J. A. Farrell*, "Chemical plume source localization," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, vol. 36, no. 5, pp. 1068–1080, 2006.