

DOI:
**МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА НА
ОСНОВЕ ИСТОРИЧЕСКИХ ДАННЫХ ¹**

Фатеева Ю.Г., Легович Ю.С., Ефремов А.Ю.

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Россия, г. Москва
ул. Профсоюзная д.65*

jfateeva@ipu.ru, legov@ipu.ru, andre@ipu.ru

Аннотация: Данное исследование посвящено обзору актуальных методов моделирования и прогнозирования качества воздуха для построения карт высокого пространственно-временного разрешения. Обсуждаются существующие методы сбора данных и необходимость интеграции моделей качества воздуха с метеорологическими моделями.

Ключевые слова: экологический мониторинг, загрязнение воздуха, модель прогнозирования качества воздуха, карты загрязнения воздуха, экологическое моделирование

Введение

В настоящее время для здоровья человека первостепенное значение имеет мониторинг и моделирование качества воздуха. Это особенно относится к крупным городам, а также территориям с неблагоприятными географическими и метеорологическими условиями с большим количеством источников выбросов, включая неконтролируемые источники. Во всем мире большое внимание государства уделяют улучшению экологической обстановки в густонаселенных районах [1].

В ЕС были выпущены Директивы по качеству атмосферного воздуха (ЕС, 2004, 2008), где устанавливаются текущие стандарты качества воздуха, а также описаны обязанности государств по созданию сети станций мониторинга и предоставлению отчетности. Обновленный обзор и анализ качества воздуха в Европе с 2000 по 2017 год представлен в [2]. Государства должны создавать зоны и агломерации на всей своей территории для оценки и управления качеством воздуха и классифицировать их в соответствии с заданными порогами оценки. В зависимости от классификации устанавливаются необходимые методы контроля (стационарные станции, индикативные измерения, моделирование). Также установлены требования по количеству и расположению точек контроля в различных зонах и агломерациях. Отмечается, что при исследовании причин превышений допустимых концентраций, по возможности, должен рассматриваться трансграничный перенос. Эти Директивы можно рассматривать в качестве базы для определения необходимых направлений развития экологического контроля в различных регионах мира с учетом их особенностей.

Для осуществления осведомленности о загрязнении окружающего воздуха как жителям городов, так и ответственным организациям для управления экологической обстановкой, 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.

В настоящее время данные о загрязнении воздуха в местах, где отсутствуют станции мониторинга, получаются с помощью математических моделей или оценок качества воздуха [3].

Процесс моделирования качества воздуха включает в себя различные химические и физические модели и имеет временные и пространственные характерные проблемы. Для получения прогнозов высокого качества необходимо оценить начальное состояние модели, а для этого имеет смысл использовать ассимиляцию данных, чтобы в лучшем случае объединить различные источники, включая данные мониторинга поверхности, данные о погоде, данные о выбросах, спутниковые данные и географические данные. Ассимиляция позволит получить качество воздуха с высокой точностью и построить качественные прогнозирующие модели.

Данное исследование посвящено обзору наиболее популярных методов моделирования и прогнозирования загрязнения окружающего воздуха на основе исторических данных с целью

¹ *В настоящее время в РАН идет обсуждение плана фундаментальных научных исследований на 2021-2035 гг., в котором большое внимание уделяется и вопросам экологии. В том числе моделям для природных биологических и экологических систем; новым пространственно-ориентированным информационно-аналитическим системам для мониторинга и прогноза экологической обстановки; разработке и реализации алгоритмов, предназначенных для поиска решений задач экологического мониторинга; исследованиям экологических проблем современного градостроительства и т.д. В связи с этим, предлагаемое исследование является актуальным и может быть использовано в дальнейшем.*

построения гео-информационных карт качества воздуха высокого пространственно-временного разрешения.

1 Источники данных о загрязнении окружающего воздуха

1.1 Стационарные станции экологического мониторинга

Сейчас в мире наиболее качественные данные о загрязнении воздуха поступают от сетей автоматических стационарных и мобильных станций контроля загрязнения атмосферного воздуха. Они осуществляют непрерывные замеры концентраций загрязнителей и являются основой для предоставления данных в задачах построения моделей прогнозирования и карт высокого пространственно-временного разрешения.

В настоящее время в мире существует более 30 000 известных станций мониторинга качества воздуха [4]. Компоновка станции мониторинга зависит как от плотности населения, так и от размера застроенной территории, и должна обеспечивать репрезентативность, непрерывность, безопасность и работоспособность.

Традиционные станции мониторинга могут измерять качество воздуха только в пределах 1–3 км, а временной интервал измерения может занимать от нескольких минут до суток [5]. Однако качество воздуха в городе изменяется нелинейно в зависимости от области, так что он не может быть адекватно зафиксирован ограниченным числом станций мониторинга. Еще одним ограничением этого метода является то, что датчики имеют короткий срок службы и требуют регулярного технического обслуживания. Поэтому использования таких датчиков - слишком дорогое решение для плотного развертывания и охвата каждого уголка города. То есть, люди, живущие и работающие вдали от станций мониторинга, не могут получать точные отчеты о качестве воздуха в реальном времени.

Использование традиционных станций мониторинга воздуха для получения актуальных данных являются необходимым, но не достаточным условием для точного картографирования загрязнения окружающего воздуха.

1.2 Беспроводные сенсорные сети

Использование недорогих портативных датчиков обеспечивает существенное расширение пространственного и временного разрешения получаемой информации. Поэтому в последние годы активно развивается система мониторинга загрязнения воздуха, объединяющая недорогие портативные измерительные датчики в беспроводную сенсорную сеть (WSN). Качество получаемых данных несравнимо ниже по сравнению со стационарными станциями [6], однако портативные датчики обеспечивают мобильность и возможность крупномасштабного развертывания узлов беспроводной сети WSN, позволяя получать данные в реальном времени [7].

Такие системы помогают исследователям более эффективно и точно строить распределение уровня загрязнения воздуха, и, как следствие, модели оценки и прогнозирования качества воздуха.

1.3 Спутниковые данные

В последнее время ведется активная работа по созданию интеграции существующих наземных сетей датчиков с альтернативными методами сбора данных, в том числе с помощью спутников [8].

Существует многообразие моделей для определения конкретного загрязняющего вещества с помощью данных, получаемых с помощью спутников, но одной из основных моделей для интерпретации того, что измеряется спутниковым прибором является модель радиационного переноса (т.е. распространения электромагнитной энергии через атмосферу Земли). Модель учитывает поглощение, излучение и рассеяние света облаками, земной поверхностью, аэрозолями и всеми газами, при прохождении через атмосферу Земли к спутнику.

Метод прямого расчета line-by-line является эталонным методом вычисления функции пропускания и позволяет с высокой точностью проводить расчеты атмосферных радиационных характеристик. Этот метод предполагает вычисление коэффициента поглощения на частоте ν суммированием вкладов от всех рассматриваемых линий в спектральном диапазоне [9].

Однако, спутниковые приборы могут предоставлять информацию только в безоблачную погоду и с низким временным разрешением. Также спутниковые приборы могут предоставить информацию не о всех загрязняющих частицах. Например, они не измеряют PM_{2.5}, но эта величина коррелируется с аэрозольной оптической глубиной (AOD). [10].

Данные, получаемые с помощью дистанционного зондирования Земли, могут служить дополнительным источником, дополняя данные, собранные наземными измерительными станциями.

Одним из возможных способов использования таких данных является анализ эпизодов трансграничного переноса, например, перенос твердых частиц при пыльных бурях в Африке на юг Европы.

1.4 Оценка загрязнения воздуха по фотографиям.

С развитием нейронных сетей все большую популярность для оценки уровня качества воздуха набирают модели, в основе которых лежит обучение, основанное на анализе изображений для оценки качества воздуха. Модель извлекает информацию о функциях из изображений сцены, снятых на мобильную камеру, а затем классифицирует их для оценки уровня качества воздуха.

Такие методы набирают все большую популярность, так как позволяют использовать данные, предоставляемые пользователями мобильных телефонов и создавать, так называемые, краудсорсинговые платформы по сбору данных.

В 2016 году авторы [11] впервые использовали метод на основе свёрточных нейронных сетей (CNN) для оценки загрязнения воздуха по фотографиям. Построенный CNN был использован для классификации изображений в соответствии с индексом $PM_{2.5}$ изображения. CNN имел 9 сверточных слоев, 2 пула и 2 выпадающих слоя и использовал улучшенную линейную единицу выпрямления в качестве функции активации для решения проблемы исчезновения градиента, а также использовал отрицательный логарифмический порядковый классификатор с графовым классификатором Softmax для решения проблемы загрязнения воздуха.

В современной работе 2020 года [12] сравниваются и анализируются несколько нейронных сетей AQC-Net (модель, созданная авторами), метод опорных векторов (SVM), сверточная нейронная сеть для извлечения признаков (VGG) и сверточная нейронная сеть (ResNet) для прогнозирования AQI посредством анализа фотографий из тестового набора NWNQ-AQI. Тесты использования различных нейронных сетей показали, что AQC-Net дает более точные результаты для классификации качества воздуха, чем другие методы.

Использование подобных моделей может существенно улучшить пространственную детализацию мониторинга качества воздуха, так как сравнение показателей смоделированного AQI с высоким коэффициентом коррелирует с реальными данными. Но на наш взгляд большим недостатком данного способа оценки качества воздуха является зависимость обученной модели от локационных начальных данных обучения и данных, зависящих от подстилающей поверхности и метеорологических особенностей региона. То есть ее масштабируемость невозможна без переобучения.

2 Модели прогнозирования качества воздуха

На сегодняшний день существует большое разнообразие подходов к прогнозированию качества воздуха. Большинство из них направлено на решение задачи краткосрочного прогноза (от 1 до 3 дней).

Среди используемых методов можно выделить три категории: климатологические, статистические и трехмерные модели [13]. Климатологические основаны на связи плохого качества воздуха с определенными погодными условиями, например, ограниченная вентиляция воздуха в течении продолжительного времени. Недостатком является их ограниченное применение, а именно то, что они способны только качественно прогнозировать превышение пороговых значений качества воздуха. Статистические же позволяют выделить количественную зависимость между качеством воздуха и метеорологическими или иными параметрами. Наиболее известные из них: классификация и дерево регресса (CART), регрессионный анализ и нейронные сети. CART использует для прогноза текущее качество воздуха и прогноз погоды, а два других метода в дополнение к прогнозу погоды используют ретроспективные данные качества воздуха. Трехмерные модели наиболее развивающееся направление, заключающееся в описании, по возможности, всех процессов, влияющих на качество атмосферного воздуха. Это приводит к разделению общей модели на отдельные подмодели: метеорологические модели, химические модели, модели выбросов и т.д.

2.1 Метеорологические модели

Базовой подмоделью является метеорологическая модель состояния атмосферы. Среди существующих моделей, пожалуй, следует выделить модель WRF. С момента своего первоначального выпуска в 2000 году модель исследования и прогнозирования погоды (WRF) стала одной из наиболее широко используемых в мире моделей численного прогнозирования погоды. Широкое признание WRF частично объясняется тем, что он предоставляется бесплатно, без обременения авторских прав или ограничений на модификацию [14].

WRF является, в основном, мезомасштабной моделью, т.е. используется на ограниченной территории: от 10 до 1000 км по горизонтали и до 10 км по вертикали. Циркуляции атмосферы в этом масштабе вызываются неоднородностью подстилающей поверхности, а именно, орографической (рельеф) и термической (неоднородный нагрев и охлаждение воздуха над разными типами поверхности). Одним из примеров таких циркуляций является бриз (на границе между сушей и морем, лесом и полем, городом и пригородом). В модели также учитывается шероховатость поверхности.

Для подготовки начальных условий для WRF используется система ассимиляции данных широкого спектра типов прямых и непрямых наблюдений: наземных, аэрологических, спутниковых. Ассимиляция данных является ключевым компонентом при прогнозировании. Для создания наилучшей оценки состояния атмосферы используются вариационные методы (3DVAR, 4DVAR) на основе наблюдений и первого предположения (фоновый прогноз), в качестве которого часто используется предыдущий прогноз.

WRF предлагает несколько вариантов физики, которые можно комбинировать любым способом: микрофизика, излучение, поверхностный слой, земельная и городская поверхности и т.д. (подробнее [15]). Сильная сторона WRF заключается в том, что она моделирует мелкомасштабные атмосферные и земные процессы лучше, чем глобальные модели.

2.2 Химические модели

В зависимости от метода, который используется для моделирования распределения концентрации загрязнения с течением времени, трехмерные модели качества воздуха делятся на ряд моделей, использующих различные математические алгоритмы. Можно выделить Гауссовы модели, основанные на дисперсии и фотохимические модели.

Алгоритм Гауссовой модели является наиболее распространенным методом для моделирования точечных источников загрязнения и основан на предположении, что загрязнитель будет расходиться в соответствии с нормальным распределением. Недостатком метода является предположение об однородности метеорологических условий, что не выполняется в реальности. Также при достаточно малых скоростях ветра максимальное расстояние, для которого можно производить расчет не будет превышать 10 км. Адаптированная модель шлейфа применима также к линейным и районным источникам. Чтобы учесть влияние высоты перемешивания на величину концентраций на уровне земли, в модель Гауссовского шлейфа был добавлен учет множественных отражений [16].

Несмотря на все недостатки, Гауссовские модели широко используются и в настоящее время для оценки качества воздуха вокруг источников загрязнения. В частности, Агентство по охране окружающей среды США рекомендует следующие модели: AERMOD, CAL3QHC/CAL3QHCR, CTDMPLUS, OCD, которые используются в различных ситуациях [17].

Дальнейшие исследования показали, что некоторые источники могут влиять на загрязнение воздуха не только локально, но и на значительном расстоянии. Кроме того, следует контролировать такие загрязнители, как озон и твердые частицы, что привело к необходимости учитывать трансграничный перенос, а модель Гауссовского шлейфа не подходит для решения таких задач.

Фотохимические модели представляют собой крупномасштабные модели качества воздуха, которые моделируют изменения концентраций загрязняющих веществ с использованием набора математических уравнений, характеризующих химические и физические процессы в атмосфере. Эти модели применяются в нескольких пространственных масштабах: локальном, региональном, национальном и глобальном.

Модели Лагранжа основаны на переносе пакетов (совокупность частиц загрязнителя) вдоль траектории. Затем вычисляется дисперсия загрязнения воздуха путем вычисления траектории непрерывного шлейфа, как рядов дискретных пакетов загрязнителей. Слоевая модель также может включать в себя распределения Гаусса для описания рассеивания загрязняющих веществ в каждом шлейфе. Данный подход имеет более высокую степень точности, в сравнении с гауссовыми дисперсионными моделями [18]. Он часто используется для охвата более длительных периодов времени, вплоть до лет. Недостаток же модели Лагранжа, состоит в том, что физические процессы, которые он может описать, являются несколько неполными.

Модели Эйлера используют фиксированную решетку (вертикальную и горизонтальную) и решают соответствующие химические уравнения одновременно во всех ячейках решетки, при этом учитывая обмен загрязняющими веществами между ячейками. Эйлера модели, решают уравнение сохранения массы для определенного загрязнителя. Большинство действующих фотохимических моделей качества воздуха приняли трехмерное Эйлерово моделирование сетки, главным образом, из-за его способности лучше и более полно характеризовать физические процессы в атмосфере и прогнозировать

концентрацию всех видов загрязнителей во всей области модели. Агентство по охране окружающей среды США рекомендует следующие модели: CMAQ, CAMx, REMSAD [19]. CMAQ - активный проект разработки с открытым исходным кодом Агентства по охране окружающей среды США, состоящий из набора программ для моделирования качества воздуха [20].

2.3 Интегрированные модели

В исследованиях последних лет все чаще встречаются работы, посвященные созданию интегрированных методов оценки качества воздуха. Метеорологические данные, данные о землепользовании и выбросах используются в качестве исходных данных для модели переноса химических веществ.

WRF-Chem - это поточная модель химии атмосферы на основе WRF, она объединяет химию и динамику на каждом временном шаге. WRF-Chem может использоваться для прогнозов рассеивания (например, вулканического пепла, пыли, дыма или других опасных компонентов), а также для прогнозирования и исследования качества воздуха с учетом сложных взаимодействий между химией, аэрозолями и физикой. Модель используется для исследования качества воздуха регионального масштаба, анализа полевых программ и взаимодействия облаков с химическими загрязнителями в масштабе облаков [14].

Компания IBM разработала комплексное решение Green Horizon по управлению качеством воздуха в Китае. Оно состоит из прогнозов качества воздуха с высоким разрешением, идентификации и отслеживания источников выбросов, а также поддержки принятия решений. Используются несколько моделей, включая WRF, WRF-CHEM, CMAQ, CAMx и др. Поскольку каждая модель работает лучше всего в различных условиях (например, температура, скорость / сила ветра, географические), система использует механизм адаптивного машинного обучения для обучения этих моделей и адаптивно регулирует параметры для каждой модели и выбирает оптимизированный с наилучшими характеристиками для каждой конкретной ситуации [21].

2.4 Другие модели

В последнее время проявился большой интерес к разработке статистических пространственно-временных моделей уровней загрязнения воздуха, наблюдаемых в больших пространственных областях, например, в континентальной части США, Европе и других частях мира, таких как Азия и Южная Америка, где загрязнение воздуха является очень заметным фактором здоровья. Эти модели используют пространственно-временную корреляцию данных о загрязнении с соответствующей метеорологической информацией, информацией об источниках выбросов, землепользовании, эпизодах трансграничных переносов и др. для получения точных прогнозов как в пространстве, так и во времени.

Иерархическая байесовская модель была модифицирована для анализа максимумов концентраций твердых частиц PM₁₀ в Мехико на основе исторических данных за период с 1995 г. по 2016 г., полученных со стационарных станций городской системы мониторинга. Построенная модель позволила построить распределение максимумов PM₁₀ и количественно оценить риск будущих экстремальных явлений, даже в неконтролируемых регионах [22].

В [23] рассматривается методология статистического моделирования и прогнозирования для долгосрочного воздействия уровней загрязнения атмосферного воздуха (NO₂, O₃, PM₁₀ и PM_{2.5}) на основе данных для Англии и Уэльса (ежедневные данные за 5-летний период 2007–2011 гг.). Информация о землепользовании, включенная в модель в качестве предиктора, дополнительно повышает точность модели. Были получены эмпирически проверенные карты загрязнения окружающего воздуха для сетки с ячейками в 1 км². В работе проанализирован метод интеграции Монте-Карло для пространственной агрегации, который позволяет получать прогнозы и их неопределенности на уровне заданной административной географии. Иерархическая пространственно-временная модель позволяет прогнозировать концентрации загрязняющих веществ в любом месте и в любой момент времени. Для байесовской модели пространства-времени была использована регрессионная модель, специфичная для типа местности. Эмпирические результаты показали значимость регрессионной модели для всех четырех загрязнителей.

В [24] рассматривается байесовская пространственно-временная модель для оценки загрязнения, но уже в краткосрочном периоде. Авторы также применяют метод моделирования, который объединяет пространственно-временную регрессионную модель землепользования для PM_{2.5} и байесовскую калибровочную модель для входных метеорологических переменных, используемых в регрессионной модели землепользования. Данные о загрязнении в этой работе брались за

трехмесячный зимний период. Анализ показал, что применение иерархической байесовской регрессионной модели землепользования для прогнозирования почасового PM_{2,5} в сочетании с калибровочной моделью для ковариат, определяемой метеорологическими переменными (скоростью ветра, температуры и относительной влажности) дает намного более точные прогнозы для PM_{2.5} при использовании откалиброванных метеорологических результатов, чем при использовании некалиброванных.

В [25] предложен новый метод ANFIS-PSO, основанный на оптимизации роя частиц (PSO), для улучшения модели ANFIS для анализа концентраций PM₁₀ в Мехико на основе данных за период с 2015 по 2017 гг. Проверка метода ANFIS-PSO показала, что он лучше приспосабливается к необработанным и неполным данным, чем модель ANFIS и частота ошибок значительно снижается.

В [26] рассмотрена городская система моделирования качества воздуха для поддержки принятия решений с использованием интегрированных моделей оценки (IAM). Модели IAM обычно отвечают на вопросы типа: «А что, если ... ?» (анализ сценариев) и охватывают весь спектр проблем - от выбросов загрязняющих веществ до их воздействия на окружающую среду и здоровье человека. Результаты химической транспортной модели использовались для обучения искусственных нейронных сетей и установления связи между выбросами прекурсоров и качеством городского воздуха.

Выводы

Проблема качества воздуха является одной из самых актуальных мировых проблем. Осознание этого уже привело к тому, что страны стали принимать определенные меры для контроля и управления качеством окружающей среды. Создание сетей стационарных станций контроля, разработка недорогих датчиков, совершенствование спутниковых технологий все это создает предпосылки для увеличения объема и повышения качества данных необходимых для эффективного контроля загрязнения воздуха.

Развитие компьютерных технологий уже привело к возможности создания эффективных моделей распространения загрязняющих веществ. Модели Эйлера на основе сеток, наиболее полно характеризуют физические процессы в атмосфере и позволяют прогнозировать концентрацию всех видов загрязнителей во всей области модели. В связи с этим, большинство действующих фотохимических моделей качества воздуха строится на этой основе. Такой подход также позволяет создавать интегрированные модели прогноза погоды совместно с прогнозированием распространения загрязнителей с учетом физико-химических процессов в атмосфере.

Моделирование загрязнения воздуха, с учетом пространственного и временного факторов, также позволяет оценить информацию о качестве воздуха в районах, где нет или недостаточно исходных данных о концентрациях загрязняющих веществ и построить прогноз его изменения для всей территории. Оценить релевантность модели можно на основе исторических данных, а также оценивая измеренные и прогнозные значения в реальном времени. Такие модели позволяют выявить взаимосвязь различных факторов загрязнения, а также определить необходимость модернизации существующих сетей мониторинга, желательность использования дополнительных источников данных, а также идентифицировать наличие не декларированных источников выбросов. Все это позволяет разработать эффективные стратегии борьбы с загрязнением воздуха.

Построение прогнозных моделей позволяет информировать население не только о текущем качестве воздуха, но и строить краткосрочные прогнозы на 1-3 дня вперед.

Отдельные исследования направлены на долгосрочное прогнозирование качества воздуха. Интеграция таких прогнозов с текущим прогнозом погоды помогает количественно оценить риск будущих экстремальных явлений, что позволяет встроить такой модуль в систему принятия решений. Кроме отметим использование байесовских пространственно-временных моделей, которые подтверждают необходимость коррекции получаемых моделей в зависимости от меняющихся метеоусловий и источников загрязнений.

Дальнейшее направление исследований может быть направлено в сторону создания интегрированных систем реального времени на основе комбинированных методов сбора данных.

Также стоит обратить внимание на необходимость совершенствования методов использования исходных данных низкой точности от недорогих датчиков и краудсорсинговых платформ. Подход с использованием нейронных сетей для оценивания качества воздуха по фотографиям требует дальнейших исследований.

Литература

1. *Paraskevopoulou D., et al.* Sources of atmospheric aerosol from long-term measurements (5 years) of chemical composition in Athens, Greece // *The Science of the total environment*, 2015, 527–528:165–178.
2. EEA Report No 10/2019. Available online: <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2019>
3. *Bravo M.A., et al.* Comparison of exposure estimation methods for air pollutants: Ambient monitoring data and regional air quality simulation. // *Environmental research*. 2012, 116:1–10
4. World-wide Air Quality Monitoring Data Coverage. Available online: <http://aqicn.org/sources/cn/>
5. *Adams M., Kanaroglou P.* Mapping real-time air pollution health risk for environmental management: Combining mobile and stationary air pollution monitoring with neural network models // *Journal of Environmental Management*, 2016, 168:133–141
6. *Alexandre M., Gerboles M.* Review of Small Commercial Sensors for Indicative Monitoring of Ambient Gas. // *Chemical Engineering Transactions*, 2012, 30, P.169–174.
7. *Ma Y., et al.* Air Pollution Monitoring and Mining Based on Sensor Grid in London. // *Sensors*, 2008, 8.
8. *Alvarez-Mendoza C., et al.* Assessment of Remote Sensing Data to Model PM10 Estimation in Cities with a Low Number of Air Quality Stations: A Case of Study in Quito, Ecuador // *Environments*, 2019, 6.
9. *Ченцов А.В.* Моделирование пропускания оптического излучения атмосферными газами в задачах радиационного переноса, автореферат, 2014, физика, 01.04.05 ВАК РФ
10. *Bryan N., et al.* Satellite data of atmospheric pollution for U.S. air quality applications: Examples of applications, summary of data end-user resources, answers to FAQs, and common mistakes to avoid // *Atmospheric Environment*, 2014, Vol. 94, P.647–662
11. *Zhang C., et al.* On estimating air pollution from photos using convolutional neural network. // *Proceedings of the 24th ACM International Conference on Multimedia*, 2016, pp. 297–301.
12. *Zhang, Q., Fu F., Tian R.* A deep learning and image-based model for air quality estimation // *Science of the Total Environment*, 2020, Vol. 724, 138178.
13. U. S. Environmental Protection Agency (EPA), Guidelines for Developing an Ozone Forecasting Program, U.S. EPA, Office of Air Quality Planning and Standards, Report No. EPA-454/R-99-009, Research Triangle Park, NC, July 1999.
14. *Powers J., et al.* The Weather Research and Forecasting Model: Overview, System Efforts, and Future Directions. // *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2017, Vol. 98, № 8, P. 1717–1737, Available online: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00308.1>
15. Available online: https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3.9/users_guide_chap5.htm#Phys
16. *Daly, A. & Zannetti, P.* Air Pollution Modeling—An Overview. Ambient air pollution. 2007.
17. US EPA. Support Center for Regulatory Atmospheric Modeling (SCRAM). Air Quality Dispersion Modeling - Preferred and Recommended Models. Available online: <https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling-preferred-and-recommended-models>
18. *Голубничий А.А., Моргачева Д.А.* Классификация моделей атмосферной дисперсии загрязнителей // *Современные научные исследования и инновации*. 2016. № 3 [Электронный ресурс]. Available online: <http://web.snauka.ru/issues/2016/03/64801>
19. US EPA. Support Center for Regulatory Atmospheric Modeling (SCRAM). Photochemical Air Quality Modeling. Available online: <https://www.epa.gov/scram/photochemical-air-quality-modeling>
20. US EPA. CMAQ. doi: 10.5281 / zenodo.107987
21. Green Horizon. Available online: <http://research.ibm.com/labs/china/greenhorizon.html>
22. *Aguirre-Salado C., et al.* Developing a hierarchical model for the spatial analysis of PM10 pollution extremes in the Mexico City metropolitan area. // *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017, 14(7):734.
23. *Mukhopadhyay S., Sahu S.* A Bayesian spatiotemporal model to estimate long- term exposure to outdoor air pollution at coarser administrative geographies in England and Wales // *Journal of the Royal Statistical Society: Series A (Statistics in Society)*, 2018, 181, Part 2, P. 465–486.
24. *Nicolis O., et al.* Bayesian spatiotemporal modeling for estimating short-term exposure to air pollution in Santiago de Chile // *Environmetrics*, 2019, P.1–14.

25. *León, B., et al.* An improved particle swarm optimization (PSO): method to enhance modeling of airborne particulate matter (PM10) // *Evolving Systems*, 2019. Available online: <https://doi.org/10.1007/s12530-019-09263-y>
26. *Relvas H., Miranda A.* An urban air quality modeling system to support decision-making: design and implementation. *Air Quality // Atmosphere & Health*, 2018, 11:815–824.