

В. А. Батурин, С. Будням, Н. С. Малтугуева, Р. К. Федоров

Оценка и моделирование загрязнения атмосферного воздуха в г. Улан-Батор

Аннотация. В работе строится математическая модель распространения примесей в атмосфере, данная модель идентифицируется для г. Улан-Батор. На основе предложенной модели разрабатывается открытая геоинформационная система для оценки и прогнозирования состояния воздушной среды в городе. Приведены результаты сценарных расчетов.

Ключевые слова и фразы: геоинформационные системы, моделирование, загрязнение атмосферного воздуха, прогнозирование, нормирование воздействий, оптимальное управление, социально-экономическое развитие.

Введение

Одной из наиболее острых проблем в г. Улан-Батор на сегодняшний день является загрязнение атмосферного воздуха. Это связано с большим количеством низких источников выбросов (юрты и небольшие котельные), использованием низкокачественного сырья и старого печного оборудования, а также с огромным количеством автотранспорта, особенно в центре города. Стоит отметить, что в данном регионе особые климатические условия (большое количество солнечных дней, температурные инверсии, ветровой режим, низкие температуры воздуха), которые способствуют образованию фотохимического смога. Все это приводит к возникновению крайне неблагоприятной обстановки, которая усугубляется в зимнее время.

Работа поддержана СО РАН (совместный российско-монгольский проект “Моделирование загрязнения атмосферы г. Улан-Батора (на основе ГИС-технологий)”).

Работа поддержана РФФИ (проект №12-07-31080 мол а “Интеллектуальная технология решения проблемы развития инфраструктуры региона с использованием системного анализа и методов математического моделирования”).

- © В. А. Батурин, С. Будням, Н. С. Малтугуева, Р. К. Федоров, 2012
- © Институт динамики систем и теории управления СО РАН, 2012
- © Институт национального развития Монгольской академии наук, 2012
- © **ПРОГРАММНЫЕ СИСТЕМЫ: ТЕОРИЯ И ПРИЛОЖЕНИЯ**, 2012

Ранее уже были отдельные попытки изучения и оценки качества атмосферного воздуха в г. Улан-Батор (Н. Сайжаа, Ц. Купул, Г. Отгон и др.), но они не позволили в полной мере разработать предложения по снижению загрязнения атмосферного воздуха, внедренные мероприятия не привели к значительным изменениям. Таким образом, данная проблема остается актуальной и существует необходимость в разработке стратегии для решения проблемы на основе современных технологий, с использованием спутниковых и других видов геоинформационных данных и расчетов.

1. Математическая модель

Используя предыдущий опыт моделирования распространения примесей в атмосфере [1–6], было предложено использовать камерную модель. Выбор этой модели обоснован тем, что соотношения, используемые в данной модели, достаточно просты, но в полной мере отображают динамику распространения поллютантов.

Рассмотрим некоторую пространственную область G – примерную зону влияния выбросов предприятия. Выделим в области G K слоев (вертикальное дробление) и в каждом слое N_k ячеек (не обязательно малых) так, чтобы все переменные (концентрацию примесей, коэффициенты диффузии, направление и скорость ветра) в каждой из ячеек можно было заменить их средними (по объему) значениями. Обозначим через V_i^k объем i -ой ячейки k -го слоя, M – число учитываемых примесей, $q_{ij}^k(t)$ – среднюю концентрацию j -го загрязняющего вещества в i -й ячейке k -го слоя в момент времени t .

Тогда динамика атмосферных примесей описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{dq_{ij}^k}{dt} = -\alpha_j q_{ij}^k + \sum_{r \in I_i^k} Q_{irj}, \quad k = \overline{1, K}, \quad i = \overline{1, N_k}, \quad j = \overline{1, M},$$

где α_j – величина, обратная интервалу времени, за который концентрация j -го загрязнителя уменьшается в e раз; I_i^k – множество всех ячеек, соседних с i -й ячейкой k -го слоя, т.е. имеющих с ней общую граничную поверхность; Q_{irj} – поток j -го загрязняющего вещества, связывающий i -ю ячейку k -го слоя с r -й соседней.

Расчет потоков. Поток Q_{irj} для двух ячеек одного слоя состоит из двух составляющих: диффузионной и конвективной. Начнем с описания **диффузионной** части. На основании первого закона Фика [7, 8], если прямая, соединяющая центры ячеек, ортогональна граничной поверхности, диффузионная составляющая потока Q_{irj} равна

$$D \frac{q_{rj} - q_{ij}}{\frac{1}{2}(L_{ri} + L_{ir})} \cos \varphi_{ir} S_{ir}.$$

Здесь S_{ir} — площадь граничной поверхности между i -й и r -й ячейками; D — коэффициент горизонтальной диффузии, а L_{ri} и L_{ir} характеризуют линейные размеры i -й и r -й камер в направлении прямой, соединяющей их центры.

В общем случае диффузионную составляющую потока Q_{irj} можно приближенно определять посредством проектирования диффузионного потока на нормаль \vec{n}_{ir} (внешнюю по отношению к i -й ячейке) к граничной поверхности между i -й и r -й ячейками. Тогда, применяя первый закон Фика, будем иметь

$$Q_{irj} = D \frac{q_{rj} - q_{ij}}{\frac{1}{2}(L_{ri} + L_{ir})} \cos \varphi_{ir} \cos \varphi_{ir} S_{ir},$$

где φ_{ir} — угол, образованный нормалью \vec{n}_{ir} и прямой, идущей из центра i -й ячейки в центр r -й.

Перейдем к описанию **конвективной** составляющей. Пусть $\vec{u}(t)$ — скорость ветра. Через $\psi_{ir}^u(t)$ будем обозначать угол, образованный вектором $\vec{u}(t)$ и нормалью \vec{n}_{ir} к поверхности границы i -й и r -й ячеек (внешней). Тогда конвективная составляющая потока равна

$$-q_{rj}(t) \|\vec{u}(t)\| \cos \psi_{ir}^u(t) S_{ir},$$

если $\psi_{ir}^u(t) < 0$ (в этом случае вектор \vec{u} образует тупой угол с внешней к i -й ячейке нормалью \vec{n}_{ir} и примеси заносятся ветром из r -й ячейки в i -ю) и

$$-q_{ij}(t) \|\vec{u}(t)\| \cos \psi_{ir}^u(t) S_{ir}$$

в противном случае.

В общем случае для описания конвективной составляющей потоков для i -й ячейки k -го слоя требуется найти взвешенные скорость и направление ветра в этой ячейке.

Множество I_i^k всех ячеек, соседних с i -й ячейкой k -го слоя (т.е. имеющих граничную поверхность ненулевой площади), подразделено следующим образом:

$$I_i^k = I_{ik}^k \cup I_{i(k-1)}^k \cup I_{i(k+1)} \cup Ext, \quad I_{ik}^k = I_{i+}^k(t) \cup I_{i-}^k(t),$$

где I_{is}^k — множество ячеек s -го слоя, являющихся соседними с i -й ячейкой k -го слоя; I_{i+}^k — ячейки из I_{ik}^k , из которых загрязняющие вещества заносятся в i -ю ячейку; I_{i-}^k — ячейки из I_{ik}^k , в которые загрязняющие вещества «выветриваются» из i -й ячейки; Ext — внешняя среда по отношению к моделируемой области; учитываем вынос горизонтальной диффузии, ветровой вынос и оседание из нижнего слоя. При этом можно считать, что с областью граничат внешние камеры тех же линейных размеров, что и i -я граничная камера области, с нулевой либо фиксированной (фоновой) концентрацией загрязняющих веществ и с теми же ветровыми характеристиками.

Пусть u_i^k — скорость ветра в i -й ячейке k -го слоя в момент t ; $\psi_{ir}^u(t)$ — угол, образованный вектором скорости ветра $\vec{u}(t)$ и нормалью к поверхности границы i -й и r -й ячеек, внешней к i -й ячейке.

Рассмотрим два случая:

- $\text{sign}(\cos(\psi_{ir}^u(t))) = \text{sign}(\cos(\psi_{ri}^u(t)))$. Тогда взвешенная скорость определяется из следующего соотношения

$$\|\tilde{u}_{ir}^k(t)\| = \frac{u_i^k + u_r^k}{2},$$

а взвешенное направление зависит от расположения углов $\psi_{ir}^u(t)$ и $\psi_{ri}^u(t)$. Если один из углов лежит в 1-й четверти, а второй в 4-й, то взвешенное направление $\tilde{\psi}_{ir}^u(t) = \frac{\psi_{ir}^u(t) - (360 - \psi_{ri}^u(t))}{2}$; в остальных случаях $\tilde{\psi}_{ir}^u(t) = \frac{\psi_{ir}^u(t) + \psi_{ri}^u(t)}{2}$ (принадлежность к I_{i+}^k или I_{i-}^k определяет знак \cos).

- $\text{sign}(\cos(\psi_{ir}^u(t))) \neq \text{sign}(\cos(\psi_{ri}^u(t)))$. Тогда $\|\tilde{u}_{ir}^k(t)\| = |u_i^k + u_r^k|$, $\tilde{\psi}_{ir}^u(t) = \frac{\psi_{ir}^u(t)u_i^k + \psi_{ri}^u(t)u_r^k}{u_i^k + u_r^k}$. В этом случае принадлежность ячеек к I_{i+}^k или I_{i-}^k определяется в зависимости от величины u_i^k и u_r^k : если $u_i^k > u_r^k$, то определяющим является знак $\cos(\psi_{ir}^u(t))$, если $u_i^k < u_r^k$, то — знак $\cos(\psi_{ri}^u(t))$.

Заметим, что если $\cos \tilde{\psi}_{ir}^u(t) > 0$, то загрязняющие вещества «выветриваются» из i -й ячейки в r -ю; если $\cos \tilde{\psi}_{ir}^u(t) < 0$, то заносятся из r -й в i -ю.

Итак, камерная модель распространения примесей приобретает вид следующей системы обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} \frac{dq_{ij}^k(t)}{dt} = & -\alpha_j q_{ij}^k + \sum_{r \in I_{ik}^k \cup Ext} \frac{|\cos \varphi_{ir}^k|}{V_i^k} \cdot 2D_H^k \cdot \frac{q_{rj}^k(t) - q_{ij}^k(t)}{L_{ri} + L_{ir}} \cdot S_{ir}^k + \\ & + \sum_{r \in I_{i+}^k(t)} \frac{1}{V_i^k} q_{rj}^k(t) \|\tilde{u}_{ir}^k(t)\| \cdot |\cos \tilde{\psi}_{ir}^u(t)| \cdot S_{ir}^k - \\ & - \sum_{r \in I_{i-}^k \cup Ext} \frac{1}{V_i^k} q_{ij}^k(t) \|\tilde{u}_{ir}^k(t)\| \cdot |\cos \tilde{\psi}_{ir}^u(t)| \cdot S_{ir}^k + \\ & + \sum_{r \in I_{i-}^k \cup I_{i(k+1)}^k} \frac{2D_V^k}{V_i^k} \cdot \frac{q_{rj}^k(t) - q_{ij}^k(t)}{L_{ri} + L_{ir}} \cdot S_{ir}^k + \\ & + \sum_{r \in I_{i(k+1)}^k} h^{k+1} \omega_j \cdot \frac{q_{rj}^{k+1}(t)}{V_i^k} \cdot S_{ir}^k - \\ & - \sum_{r \in I_{i(k-1)}^k \cup Ext} h^k \omega_j \cdot \frac{q_{ij}^k(t)}{V_i^k} \cdot S_{ir}^k + \frac{1}{V_i^k} \cdot f_{ij}^k, \end{aligned}$$

где $k = \overline{1, K}$, $i = \overline{1, N_k}$, $j = \overline{1, M}$. Напомним что k – номер слоя; i, r – номера ячеек; j – порядковый номер загрязняющего вещества; α_j – постоянная распада j -го вещества; ω_j – скорость оседания примеси под действием силы тяжести; D_H^k, D_V^k – коэффициенты для k -го слоя горизонтальной и вертикальной диффузии соответственно; h^k – высота k -го слоя; V_i^k – объем i -й ячейки k -го слоя; $q_{ij}^k(t)$ – средняя (по объему) концентрация j -го загрязняющего вещества в i -ой ячейке k -го слоя в момент времени t ; S_{ir}^k – площадь граничной поверхности i -й ячейки k -го слоя с r -й соседней; L_{ir} – средняя длина i -й ячейки k -го слоя в направлении прямой, соединяющей центры i -й и r -й ячеек; φ_{ir}^k – угол, образованный лучом, идущим из центра i -й ячейки k -го слоя в центр r -й соседней, и внешней по отношению к ячейке с номером i нормалью к поверхности границы i -й и r -й ячеек; f_{ij}^k – интенсивность выбросов j -го загрязнителя в i -й ячейке k -того слоя; $\tilde{u}_{ir}^k(t)$, $\tilde{\psi}_{ir}^u(t)$ – взвешенные скорость и направление ветра между i -й и r -й ячейками k -го слоя.

2. Открытая геоинформационная система

Предлагаемая модель была реализована в открытой геоинформационной системе для оценки и прогнозирования состояния атмосферного воздуха в г. Улан-Батор. Существует большое количество систем моделирования загрязнений: «Моделирование распространения примесей от выбросов промышленных предприятий и автотранспорта в атмосфере г. Липецка», «Атмосферный воздух» отдела государственного регулирования в сфере охраны окружающей среды Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности Санкт-Петербурга, ГИС «Атмосфера-Алтай» Алтайского государственного технического университета и др. Все эти системы являются настольными и/или ориентированными на определенную территорию. В направлении создания общедоступных Интернет-сервисов обработки данных активно развиваются географические информационные системы (ГИС), например Advanced Geographical Information System for the Web (<http://www.cartoweb.org/>), FreeGIS Database (<http://freegis.org>), Quantum GIS Project (<http://www.qgis.org/>). Также создаются геопорталы, являющиеся важным элементом инфраструктуры пространственных данных (ИПД). Необходимо заметить, что в ИПД геопорталы реализуют в основном функции, связанные с публикацией данных в Интернет, т.е. загрузку и визуализацию данных, формирование метаинформации и т.д. Применение удаленно через сеть Интернет алгоритмов моделирования загрязнений развито достаточно слабо. Предоставление Интернет доступа к различным моделям и алгоритмам требует значительных временных вложений разработчиков. Кроме расчетного модуля программная система должна обеспечить ряд вспомогательных функций, без которых использование расчетного модуля невозможно. Для решения поставленных задач была создана гибридная ГИС, позволяющая в открытом доступе использование и накопление различных моделей и алгоритмов, касающихся моделирования загрязнений воздуха различных территорий.

Разработанная геоинформационная система обеспечивает хранение исходных данных, расчет по модели, отображение информации и

комплексный анализ многовариантных расчетов. Архитектура данной гибридной ГИС позволяет в открытом доступе использование и накопление различных моделей и алгоритмов, касающихся моделирования загрязнений воздуха различных территорий. Для анализа состояния атмосферы г. Улан-Батор были собраны и сформированы базы данных гибридной ГИС:

- схема географического размещения промышленных предприятий и жилой зоны;
- ежедневные данные метеорологических наблюдений (скорость и направление ветра, относительная влажность, температура воздуха, параметры инверсий, облачность) за 2009–2010 год;
- ежедневные и разовые концентрации примесей в атмосферном воздухе, измеряемых по постам наблюдения с учетом их географического размещения за 2009–2010 год (не менее 200 наблюдений по каждому ингредиенту по каждому посту наблюдения с отбором проб либо непрерывным в течение суток, либо четырехкратным отбором проб);
- объемы выбросов в атмосферный воздух по отдельным ингредиентам котельными, ТЭЦ, юртами;
- географическое размещение на территории города юрт;
- количественные и качественные характеристики сжигаемого топлива в юртах за 2009–2010 год.

За основу взят космоснимок, который привязан к данным, переданным с Монгольской стороны (ТЭЦ, котельные, автомобильные дороги).

Разработан сервис расчета плотности точечных объектов в ячейках регулярной сетки. На входе сервиса — слой векторных объектов. На выходе — количество объектов, находящихся в ячейках регулярной сетки, в формате GeoTIFF. Пользователь может задать размер ячейки и область обработки. Сервис производит подсчет количества объектов в ячейках, а если задан атрибут семантики слоя входных данных, то производится суммирование значений семантики по этому атрибуту. Данный сервис используется для расчета выбросов от точечных объектов, например юрт. В качестве значения атрибута может использоваться количество выбросов из одной юрты на единицу времени. Доступ к слою осуществляется

через библиотеку OGR, что позволяет использовать любые известные форматы, а также СУБД.

Разработан сервис расчета плотности линейных объектов в ячейках регулярной сетки. На входе сервиса — слой векторных объектов. На выходе — общая длина участков линейных объектов, находящихся в ячейках регулярной сетки, в формате GeoTIFF. Пользователь может задать размер ячейки и область обработки. Сервис для каждого линейного объекта производит трассировку и суммирование длин участков линейных объектов в ячейках, а если задан атрибут семантики слоя входных данных, то производятся умножения длины участка объекта на значение атрибута, а затем общее суммирование. Данный сервис используется для расчета выбросов дорожной сети. В качестве значения атрибута может быть принято количество выбросов на единицу длины дороги.

Разработан сервис интерполяции точечных данных на ячейки регулярной сетки методом естественных соседей. На входе сервиса — слой точечных векторных объектов. На выходе — интерполируемые значения в ячейках регулярной сетки, в формате GeoTIFF. Пользователь может задать размер ячейки и область обработки. Сервис использует OpenSource библиотеку CGAL. Данный сервис используется для расчета начального состояния системы дифференциальных уравнений по данным станций наблюдений, расчета направления и силы ветра.

Разработан модуль отображения результатов. Данный модуль позволяет отображать пространственные данные в различных форматах, доступных с помощью библиотеки GDAL (в частности, векторные файлы в формате SHP и из СУБД PostgreSQL, растровые данные в формате GeoTIFF), и основывается на библиотеках OpenLayers, Mapserver. Позволяет задавать способ отображения данных (например, градиентную заливку в зависимости от значений объектов или ячеек), классы значений; можно построить линии уровня.

3. Сценарные расчеты

Произведен ряд сценарных расчетов. Начальное состояние везде было взято на уровне ПДК, выбросы рассчитывались для каждой

ячейки в зависимости от количества источников загрязнения в этой ячейке. Взято два слоя: первый – от 0м до 50м, второй – от 50м до 200м, выбросы от ТЭЦ учитывались во втором слое, а остальные выбросы – в первом. На данном этапе взята равномерная сетка, т.е. каждый слой разбит на квадратные ячейки 800м×800м (в дальнейшем планируется измельчение сетки). Расчеты производились на период времени от трех суток до трех месяцев. На данном этапе рассматривался только отопительный сезон, когда выбросы от юрт и ТЭЦ максимальны. Модель идентифицирована для четырех видов поллютантов: оксид углерода (CO), зола (PM₁₀), оксиды азота в пересчете на NO и оксид серы (SO). Выбор этих примесей обусловлен наличием информации о расчете количества выбрасываемого вещества на определенное количество сжигаемого топлива, а также наиболее полной информацией о реальных концентрациях этих веществ в атмосфере города (по данным наблюдений передвижных и стационарных измерительных станций, предоставленных монгольской стороной).

Были просчитаны сценарии с различными ветровыми потоками, с изменением количества источников выбросов, а также с изменением качества топлива. По результатам расчетов выявлены районы с наиболее неблагоприятной обстановкой (в основном это районы ТЭЦ, районы скопления юрт и центр города), в них особо ярко наблюдаются изменения при изменении ветровых потоков. При улучшении качества сжигаемого топлива наблюдается значительное снижение концентрации всех рассматриваемых примесей за исключением CO, что обусловлено тем, что выброс CO на единицу сжигаемого топлива увеличивается при улучшении качества угля. Очевидно, что при значительном уменьшении количества юрт и автотранспорта концентрация примесей оставалась в рамках уровня ПДК. Но такого рода сценарии неосуществимы на практике.

Список литературы

- [1] Боховко Г. В., Константинов Г. Н. *Моделирование влияния топливно-энергетического комплекса на локальный климат* // Географические исследования восточных районов СССР. – Иркутск, 1981, с. 148–149. ↑1

- [2] Дыхта В. А., Колокольникова Г. А., Никифорова И. А. *Математическая модель производства целлюлозно-бумажного предприятия* // Участие молодежи Иркутской области в решении проблем комплексного освоения природных ресурсов и развития производительных сил области. — Иркутск, 1983, с. 186–188. ↑
- [3] Марчук Г. И. *Математическое моделирование в проблеме окружающей среды*. М. : Наука, 1982. — 320 с. ↑
- [4] Москаленко А. И. *Осредненная модель управления динамикой атмосферных загрязнений* // Модели управления природными ресурсами. — М. : Наука, 1981, с. 225–231. ↑
- [5] Колокольникова Г. А. *Модель распространения загрязнений, выбрасываемых предприятием в атмосферу* // Модели и методы оценки антропогенных изменений геосистем. — Новосибирск : Наука, 1986, с. 90–96. ↑
- [6] Структура и ресурсы климата Байкала и сопредельных пространств. Новосибирск : Наука, 1977. — 272 с. ↑¹
- [7] Яглом А. М. *О турбулентной диффузии в приземном слое атмосферы* // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1972, № 6, с. 579–594. ↑¹
- [8] Берлянд М. Е. *Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы*. Л. : Гидрометеоиздат, 1975. — 448 с. ↑¹

Рекомендовал к публикации

Программный комитет Молодёжной школы-семинара

Модели и методы исследования гетерогенных систем

Об авторах:



Владимир Александрович Батурин

Доктор физико-математических наук, профессор, автор эффективных методов решения задач оптимального управления. Научные интересы: задачи оптимального управления, численные методы решения задач оптимального управления, медико-эколого-экономическое моделирование
e-mail: rozen@icc.ru



Санжа Будням

Доктор физико-математических наук, профессор, основные научные интересы лежат в области математического моделирования эколого-экономических процессов
e-mail: no@email.sorry



Надежда Станиславовна Малтугуева

Научные интересы: непрерывно-дискретные системы, условия оптимальности, численные методы решения задач оптимального управления, математическое моделирование

e-mail: malt-nadezhda@yandex.ru



Роман Константинович Федоров

Научные интересы: геоинформационные системы, нечеткая логика, распознавание образов

e-mail: fedorov@icc.ru

Образец ссылки на эту публикацию:

В. А. Батурин, С. Будням, Н. С. Малтугуева, Р. К. Федоров. *Оценка и моделирование загрязнения атмосферного воздуха в г. Улан-Батор* // Программные системы: теория и приложения : электрон. научн. журн. 2012. Т. 3, № 5(14), с. 81–91.

URL: http://psta.psir.ru/read/psta2012_5_81-91.pdf

V. A. Baturin, S. Budnyam, N.S. Maltugueva, R. K. Fedorov. *Evaluation and modeling of air pollution in Ulaanbaatar.*

ABSTRACT. A mathematical model of the distribution of pollutants in the atmosphere is constructed, the model is identified for Ulaanbaatar. Based on the proposed model open GIS system for the evaluation and forecasting of environmental air in the city is developed. It's presented the results of scenario calculations.

Key Words and Phrases: GIS, modeling, air pollution, forecasting, valuation effects, optimal control, social and economic development.