

ЭКОЛОГИЯ И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 551.558

О РАСПРОСТРАНЕНИИ АТМОСФЕРНЫХ ПРИМЕСЕЙ В ГОРНО-СТЕПНОЙ ЗОНЕ

© 2007 г. А.М. Керимов, Е.А. Корчагина, А.В. Шаповалов, В.А. Шаповалов

The numerical model for the mesoscale impurity distribution analysis in the mountains, foothills and steppe zone (by the example of the Kabardino-Balkarian Republic) is submitted. The detailed equations of hydrothermodynamics, carry of gas impurity, condensation and coagulation equations are applied, dry sedimentation and aerosols washing away is taken into account. For the meteorological parameters' fields and polluting components analysis the module of three-dimensional data presentation is developed on the basis of modern graphic libraries and programs of visualization (OPENGL, DirectX, GoogleEarth, Vis5d).

Вопросы моделирования распространения загрязняющих веществ в атмосфере достаточно подробно рассмотрены в [1 – 6]. Вместе с тем эта проблема требует дальнейшего развития, в частности, для регионов с широким спектром местных условий.

Горы существенным образом воздействуют на погоду в окрестностях. Во-первых, вследствие динамических и термодинамических процессов наблюдается модификация синоптических систем погоды или воздушных потоков в значительном слое атмосферы [7–9]. Во-вторых, имеется периодическое возникновение характерных региональных условий погоды, в том числе систем ветров, облачности и режимов осадков, вызываемых динамическими и термодинамическими процессами. Третий тип воздействия гор как результат различий склонов и их ориентации проявляется главным образом в локальном масштабе (от десятков до сотен метров) и формирует мозаику топоклиматов. В случае систем склоновых и долинных ветров этот тип может проявляться в региональном масштабе.

В последнее время экосистемы гор испытывают большие нагрузки в результате человеческой деятельности. Актуален в связи с этим прогноз их изменения под воздействием различных факторов. Один из этапов таких исследований – изучение распространения загрязняющих веществ в результате деятельности промышленных предприятий, объектов энергетики, транспорта и вследствие катастроф антропогенного или природного происхождения.

Построение математических моделей распространения атмосферных примесей позволяет исследователям решать широкий спектр задач, в том числе изучать региональные особенности загрязнения окружающей среды [1–3, 10, 11].

Исходной информацией для инициализации моделей являются метеорологическая и данные о текущем состоянии природной среды.

Существует проблема построения адекватных математических моделей, позволяющих достаточно корректно описывать распространение примесей [2, 4, 6]. Большую сложность представляет создание региональных и мезомасштабных моделей. Однако необходимость подобных моделей обусловлена наличием характерных для мезорайона особенностей, которые существенны для корректных оценок. Следует отме-

тить, что разработка таких моделей находится на начальном этапе развития.

В данной работе представлена математическая модель распространения примесей в мезомасштабной области, охватывающей горы, предгорья и часть степной зоны (на примере КБР). В модель заложены соответствующие природно-климатические условия. Предварительные расчеты показали работоспособность модели. Для анализа полей метеорологических параметров и загрязняющих компонент разработан модуль трехмерного представления данных на основе современных графических библиотек и программ визуализации

Краткое описание численной модели

Модель включает систему уравнений гидротермодинамики для описания региональных атмосферных процессов, аналогичную представленной в [3]. Для учета орографии в модели используется обобщенная система координат $(\bar{x}, \bar{y}, \sigma)$, связанная с рельефом местности:

$$x \equiv \bar{x}, \quad y \equiv \bar{y}, \quad \sigma = \frac{z - \xi(x, y)}{H - \xi(x, y)} H,$$

где H и H – высота верхней границы соответственно в z - и σ -системе координат; $\xi(x, y)$ – функция, описывающая рельеф [3].

Блок гидротермодинамики описывает изменение со временем динамических и термодинамических характеристик атмосферы в расчетной области.

Перенос многокомпонентных газовых примесей рассчитывается с учетом процессов фотохимической трансформации и микрофизических процессов нуклеации, конденсации и коагуляции.

Основные уравнения для скорости измерения концентрации многокомпонентных газовых примесей и аэрозолей записываются в следующем виде [3]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial C_i}{\partial x_j} = F_i^{gas} + P_i^{nucl} + P_i^{cond} + P_i^{phot} + \\ + \frac{\partial}{\partial x_j} K_{JJ} \frac{\partial C_i}{\partial x_j}; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \varphi_i}{\partial t} + (u_j - \delta_{j3} w_g) \frac{\partial \varphi_k}{\partial x_j} = F_k^{aer} + P_k^{nucl} + P_k^{cond} + P_k^{phot} + \frac{\partial}{\partial x_j} K_{JJ} \frac{\partial \varphi_k}{\partial x_j}, \quad (2)$$

где $j = 1, 3$ ($u_1 = u$, $u_2 = v$, $u_3 = w$), ($x_1 = x$, $x_2 = y$, $x_3 = z$); C_i , $i = 1, \dots, N_g$ – концентрация газовых примесей и аэрозолей; $\varphi_k = 1, \dots, N_a$ – числа газовых компонент и аэрозольных фракций; (u, v, w) – компоненты вектора скорости ветра в направлении x, y, z ; w_g – скорость гравитационного оседания; F^{gas} и F^{aer} – источники газовых примесей и аэрозолей; P^{nucl} , P^{cond} , P^{coag} и P^{phot} – нелинейные операторы нуклеации, конденсации, коагуляции и фотохимической трансформации.

Уравнения (1)–(2) рассматриваются в области

$$B_t = D[(0, T)],$$

$$D = \{(x, y, z); x \in [-X, X], y \in [-Y, Y], z \in [z_0, h]\},$$

где h – верхняя граница области интегрирования. Начальные условия задаются в виде

$$C_i(x, y, z) = C_i^0(x, y, z); \varphi_i(x, y, z) = \varphi_i^0(x, y, z) \quad \text{при } t = 0. \quad (3)$$

На боковых границах области задаются следующие краевые условия:

$$\varphi_i|_{\Omega} = \varphi_i^b, \text{ есть } u_n < 0,$$

$$\frac{\partial \varphi_i}{\partial n}|_{\Omega} = 0, \text{ есть } u_n \geq 0, \quad (4)$$

где Ω – боковая поверхность; n – внешняя нормаль к Ω , u_n – нормальная компонента вектора скорости.

Уравнение турбулентной диффузии решается по методу покомпонентного расщепления.

Удаление микропримесей газов из воздуха осуществляется за счет различных механизмов. Они включают в себя абсорбцию и осаждение на поверхность земли, самоочищение в процессах образования облаков и туманов, вымывание осадками и т.д.

В предгорьях и горах туманы – частое явление даже в теплый период года, поэтому вымывание примесей туманами здесь играет большую роль, и необходимо учитывать этот процесс при моделировании. Производя расчет в модели изменений со временем температуры и влажности воздуха, несложно определить области, в которых образуется конденсированная фаза при охлаждении воздуха.

Химические реакции, обуславливающие превращение одних веществ в другие, также в некотором смысле можно отнести к механизмам удаления загрязнений из атмосферы. Скорость выведения газов при этом будет зависеть от химической реакционной способности их молекул, а также от растворимости в конденсированной фазе. Малореакционноспособные газовые микропримеси могут оставаться в атмосфере годами, а более реакционноспособные соединения, такие как сернистый газ, двуокись азота, остаются в атмосфере лишь несколько дней.

Вымывание газов в тумане может происходить путем: 1) простого растворения газов в воде тумана в соответствии с законом Генри (примерами могут служить N_2O и CH_4); 2) растворения с последующей обратимой гидратацией и диссоциацией (примерами

являются CO_2 и NH_3); 3) растворения и последующего необратимого превращения или реакции с другими веществами в воде тумана (примерами могут служить SO_2 и NO_2).

Газы-загрязнители: CO , SO_2 , NO , NH_3 – обладают способностью растворяться в той или иной степени в воде. По степени растворимости их можно расположить в следующий ряд: NH_3 , SO_2 , NO , CO . Хуже всего растворяется окись углерода. Для нее основным стоком в окружающей среде является поглощение подстилающей поверхностью как суши, так и поверхностью водоемов, озер, морей и океанов.

Для расчета влажного вымывания примесей атмосферными осадками в модели предлагается использовать данные радиолокационных наблюдений. С помощью автоматизированных метеорологических локаторов МРЛ-5 в аэропортах через определенные промежутки времени строятся карты распределения облаков и осадков на большой площади. Данные об интенсивности осадков позволяют более корректно рассчитывать поток примесей на поверхность земли в результате вымывания, чем при использовании среднестатистических данных метеопостов.

Для анализа полей метеорологических параметров и загрязняющих веществ авторами разработан программный модуль трехмерного представления данных на основе современных графических библиотек (OpenGL, DirectX) и программ визуализации (GoogleEarth, Vis5d).

Модуль предназначен для визуализации больших многомерных сеточных наборов данных, полученных в модели. Программа позволяет строить изоповерхности, плоскости линий контура, цветные плоскости, объемные представления данных в трехмерной сетке, затем вращать и анимировать изображения в режиме реального времени. Реализованы также возможности рассмотрения траектории ветра, изменение прозрачности объектов и др.

Применение средств визуализации объемных данных дает возможность их интерпретации на более высоком уровне по сравнению с двумерными представлениями.

Разработке и численной реализации модели способствовал опыт авторов в математическом моделировании конвективных облаков [7, 12] на основе детальных уравнений термодинамики и микрофизики облачных процессов [13, 14], а также в создании разного уровня моделей распространения примесей [11].

Некоторые результаты расчетов на основе модели

Для проверки работоспособности модели, а также алгоритмов численной реализации проведены тестовые расчеты, которые показали эффективность модели при расчетах распространения примесей, в том числе и на средние расстояния.

На основе построенной модели проведены предварительные расчеты при различных исходных данных. Моделировался стационарный источник.

Была выбрана достаточно большая область (рис. 1), представляющая собой прямоугольный пространственный параллелепипед со сторонами $180 \times 180 \times 12$ км и охватывающая зоны с различными физико-географическими характеристиками.

Центр прямоугольника в основании параллелепипеда имеет координаты E:43.50, N:43.50. Ось Y направлена на север, ось X – на восток. Область включает полностью территорию КБР, частично – КЧР, Ставропольского края и РСО-Алания.



Рис. 1. Отображение расчетной области в программе GoogleEarth. На карте представлен Кавказский хребет; слева внизу – фрагмент Черного моря, справа сверху – фрагмент Каспийского моря, белый прямоугольник – область моделирования

На карту рельефа в области моделирования для наглядности нанесена триангуляционная сетка (рис. 2). На основе этих данных строится двумерная функция, аппроксимирующая рельеф.

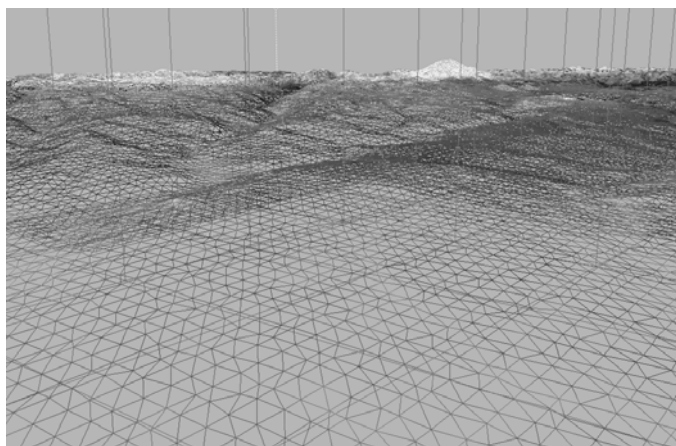


Рис. 2. Карта рельефа в области моделирования с триангуляционной сеткой. На горизонте выделяется Эльбрус

В начальный момент концентрация примеси нулевая, кроме точки (10, 120, 0,2), где концентрация равна 100 м^{-3} .

Подстилающая поверхность в начальный момент времени чиста. Значения некоторых физических параметров, используемых при расчетах: $k_x = k_y = k_z = 15 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$; $v_x = 8 \text{ м/с}^{-1}$; $v_y = -8 \text{ м/с}^{-1}$; $v_z = 0$.

Источник примеси расположен в точке (10; 120; 0,2), его мощность $100 \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$.

Результаты моделирования, получаемые с помощью предложенной математической модели, позволяют получать информацию о распределении примеси в приземном слое атмосферы от различных источников загрязнения с учетом динамических и гидротермодинамических параметров атмосферы (рис. 3).

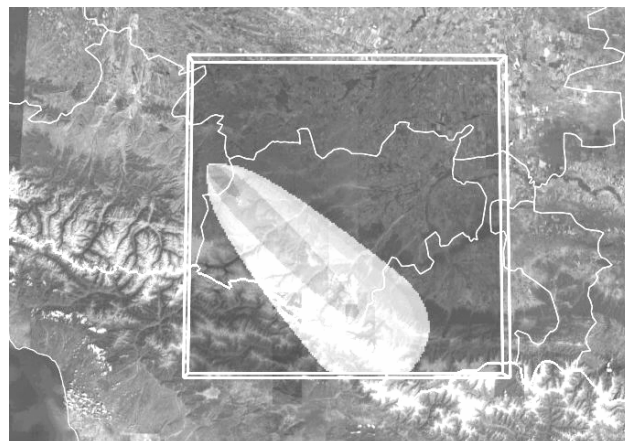


Рис. 3. Результаты расчетов распространения примеси при $t = 300 \text{ мин}$. Контуры проведены через порядок величины, внешний контур соответствует концентрации 10^{-3} м^{-3} . Отображены границы республик Северного Кавказа. В область моделирования полностью попадает Кабардино-Балкарская Республика

Используемые средства визуализации данных позволяют следить за распространением примесей в процессе численного эксперимента, что актуально как при оценке экстремальных ситуаций, так и при долгосрочном прогнозировании состояния окружающей среды.

Использование данных автоматизированных МРЛ качественно улучшает анализ экологической обстановки в исследуемом регионе. При необходимости могут быть задействованы данные региональной радарной метеорологической сети.

Автоматизированные МРЛ обеспечивают:

- получение радиолокационной информации в полусфере обзора за время 3–7 мин;
- фильтрацию отражений от местных предметов;
- отображение общей информации о наличии, интенсивности, направлении и скорости смещения и тенденции развития облачности на расстоянии до 250 км;
- расчет карт явлений погоды (град, гроза, ливневый дождь, снегопад, шквал), интенсивности и количества осадков;
- архивацию и отображение накопленной информации;
- передачу данных по каналам связи для заинтересованных потребителей.

На рис. 4 представлена карта интенсивности осадков с автоматизированного МРЛ-5 Северо-Кавказской военизированной службы по воздействию на метеорологические процессы. Такие данные, а также карты накопленных осадков за период времени позволяют рассчитать поток примесей на подстилающую поверхность за счет вымывания.

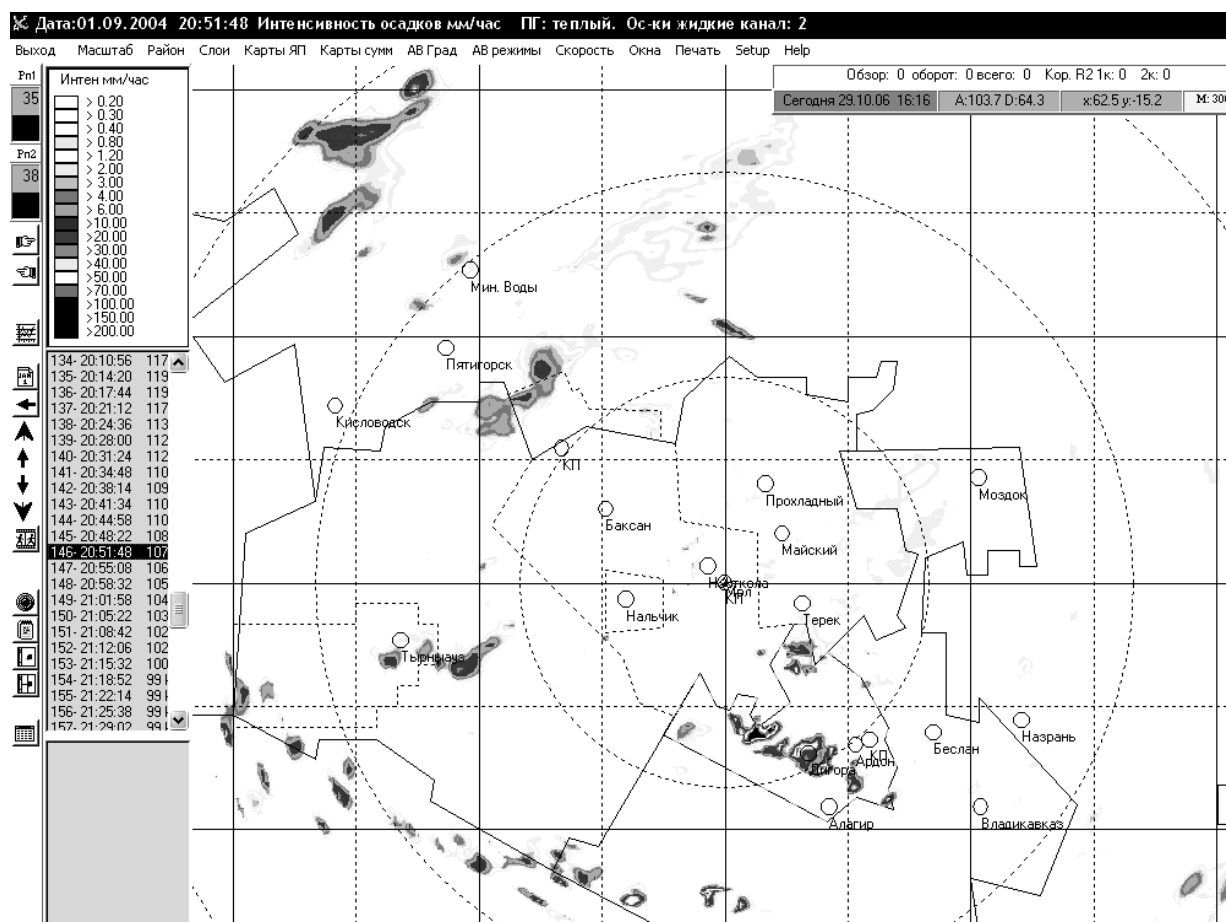


Рис. 4. Поле интенсивности осадков в области моделирования, по данным МРЛ-5, расположенного в районе г. Нарткала, КБР. В правом верхнем углу представлена шкала градаций интенсивности осадков, мм/ч

При создании информационных систем обеспечения метеорологической и экологической безопасности жизнедеятельности людей возможность расчета распространения загрязнений и количественная оценка их потоков на подстилающую поверхность позволяют прогнозировать развитие неблагоприятных ситуаций и при необходимости принимать меры по недопущению вредного воздействия на людей, фауну и флору.

Следует также отметить, что результаты численного моделирования формирования микроструктуры градовых облаков [7] и электрического заряда в них [12] показали, что в облаках происходят сложные взаимодействия различных физических процессов, роль которых велика и пренебрегать которыми нельзя. То же самое можно сказать и о физике распространения газовых примесей и аэрозолей. Очевидно, растворяясь в облачных каплях, примеси начинают влиять на дальнейшее развитие микрофизических процессов. Эти вопросы требуют отдельного рассмотрения.

Таким образом, из вышеизложенного следует, что разработанная математическая модель мезомасштабного распространения атмосферных примесей с учетом сухого осаждения и вымывания осадками применима для оценки загрязнения окружающей среды в зонах от степной до горной от различных источников. Учитываются рельеф местности и географическая привязка объектов. Данные интерпретируются в программе визуализации GoogleEarth.

Для учета влажного вымывания примесей предложено использовать данные радиолокационных наблюдений облачности и осадков с помощью метеорологических локаторов.

Проведены предварительные расчеты распространения вредных веществ от стационарного источника.

Данную работу следует рассматривать как начальный этап работ по созданию региональной модели распространения примесей на территории, включающей Кабардино-Балкарскую Республику.

Планируется дальнейшее развитие модели для более глубокого исследования переноса загрязняющих веществ, в том числе для исследования распространения примесей из предгорной зоны в горную.

Работа выполнена при финансовой поддержке
МОН КБР и РФФИ, гранты № 06-05-96654, № 06-05-
96654.

Литература

1. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л., 1975.
2. Дымников В.П., Алоян А.Е. // ИАН. Физика атмосферы и океана. 1990. Т. 26. № 12. С. 1237–1247.
3. Алоян А.Е., Пененко В.В., Козодеров В.В. // Современные проблемы вычислительной математики и математического моделирования. Т. 2. М., 2005. С. 279–351.
4. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М., 1982.

5. Ровинский Ф.Я. и др. // Метеорология и гидрология. 1994. № 10. С. 5–14.
6. Самарская Е.А., Сузан Д.В., Тишкин В.Ф. // Математическое моделирование. 1997. Т. 9. № 11. С. 59–69.
7. Ашабоков Б.А., Федченко Л.М., Шаповалов А.В., Шоранов Р.А. // Метеорология и гидрология. 1994. № 1. С. 41–48.
8. Teixeira M.A.C., Miranda P.M.A. // J. of the Atmospheric Sciences. 2004. Vol. 61. P. 2638–2643.
9. Miranda P.M., James I.N. // Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 1992. Vol. 118. P. 1057–1081.
10. Белов И.В. и др. // Математическое моделирование. 2000. Т. 12. № 11. С. 38–46.
11. Пискунова Е.Г., Тлисов М.И., Шаповалов А.В. Численное моделирование локального и мезомасштабного распространения загрязняющих веществ в атмосфере. Нальчик, 2005.
12. Корчагина Е.А., Шаповалов А.В. // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2004. № 3. С. 56–62.
13. Коган Е.Л. и др. Численное моделирование облаков. М., 1984.
14. Израэль Ю.А. Экология и контроль состояния природной среды. М., 1984.

Кабардино-Балкарский научный центр РАН, Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик 10 ноября 2006 г.