

В.В. Пененко, Е.А. Цветова

Анализ масштабов антропогенных воздействий в атмосфере

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск

Поступила в редакцию 8.02.2000 г.

С целью отработки методики предварительных оценок масштабов возможных последствий антропогенных воздействий на климатическую систему предлагается использование сценарного подхода. Сценарии моделирования, представленные в работе, реализованы на базе комплекса моделей переноса загрязняющих примесей в атмосфере в полусферном варианте. Чтобы быть как можно ближе к реальности, для формирования сценариев атмосферной циркуляции использовались данные Reanalysis NCEP/NCAR США. Представлены результаты численных экспериментов, показывающие возможные масштабы областей загрязнения атмосферы северного полушария от источников, расположенных на территории Сербии.

Введение

События последнего года ушедшего тысячелетия наглядно подтвердили наш тезис о том, что на современном этапе общественного развития экология в индустриально нагруженных регионах переходит в разряд важнейших социально-экономических и геополитических факторов [1]. Действительно, с повышением технической сложности и удельной мощности энергетических и производственных объектов не снижается опасность крупномасштабных техногенных катастроф, которые, в свою очередь, могут приводить к серьезным экологическим последствиям. Более четко вырисовалась тенденция силового решения международных и внутренних конфликтов с применением экологически опасных средств и систем вооружений. Вышла из тени на свет новейшая концепция ведения военных операций с преднамеренным управляемым стимулированием экологических катастроф путем разрушения экологически опасных гражданских объектов. Реализация этой концепции уже в который раз продемонстрирована мировому сообществу на практике посредством проведения, по сути дела, антропогенных натурных экспериментов в реальных условиях.

Возникает вопрос, как проинформировать общественность и заинтересованных специалистов о возможных экологических последствиях такого рода экспериментов в упреждающем порядке?

Мы видим решение проблемы в формулировке типичных природоохранных задач, которые реализуются с помощью математического моделирования в рамках сценарного подхода. Причем для формирования сценариев предлагается использовать ретроспективную натурную информацию о поведении реальной климатической системы.

Следующие два тезиса объясняют выбранную нами стратегию исследований на основе типичных сценариев. Первый: натурные эксперименты в реальных условиях обладают свойствами необратимости. Их невозможно повторить в природе из-за изменчивости процессов. Второй: при прогнозировании возможного развития ситуации возникают проблемы с неопределенностью в априорном задании источников воздействий и с предсказуемостью прогностических методик и моделей.

Естественно, возникает вопрос о создании информационно-моделирующей системы для проигрывания таких ситуаций с помощью математических моделей. Результаты этих расчетов могут быть использованы для предсказания возможных последствий антропогенных воздействий. Такая система многофункционального назначения разрабатывается в ИВМ и МГ СО РАН в сотрудничестве с другими научными коллективами.

В статье приводится пример решения одной характерной задачи рассматриваемого класса. В качестве источника антропогенных воздействий в ней участвовали агрегированные источники выброса загрязняющих примесей и тепла. В данном случае нас интересовала ситуация, которая разворачивалась в Центральной Европе во время проведения акции НАТО в Сербии.

Сценарии моделирования, представленные в работе, реализованы на базе комплекса моделей в полусферном варианте [1], которая включает модель переноса загрязняющих примесей в атмосфере и информационную модель генерирования гидродинамического фона с помощью модели гидротермодинамики атмосферы [2] и базы данных фактической информации в режиме усвоения. Чтобы быть как можно ближе к реальности, для формирования сценариев атмосферной циркуляции использовались данные Reanalysis NCEP/NCAR США [3]. Система подготовки данных, включенная в комплекс моделей, описана в [4].

1. Постановка задачи и структура моделей

Отвлекаясь от политических вопросов, рассмотрим естественнонаучные аспекты проблемы антропогенных воздействий. Возникающие в данном случае первоочередные задачи состоят в оценке экологической перспективы при различных вариантах антропогенных нагрузок на фоне естественного течения процессов в климатической системе. Для этого прежде всего необходимо оценить пространственно-временные масштабы взаимодействий в этой системе. Они определяют размеры экологически значимых последствий влияния того или иного источника.

Математические постановки таких задач можно отнести к классу задач типа «источник–детектор». Исходной информацией в них являются сведения о параметрах дей-

ствующих источников. Зоной-детектором, которая также обозначается во входных данных, служит выбранный регион, подвергающийся воздействиям от источников через процессы, реализующиеся в климатической системе.

Поскольку, как правило, энергетический вклад источников относительно мал по сравнению с крупномасштабной энергетикой атмосферы, то будем рассматривать процессы, связанные с переносом и трансформацией загрязняющих веществ, предполагая в первом приближении, что энергетическое воздействие источников на климатическую систему пренебрежимо мало.

Уравнения модели переноса и трансформации загрязняющих примесей записаны для сферической Земли, вертикальная координата представляет собой гибридную «*p*-сигма» систему, состоящую из изобарических координат выше уровня 500 мбар и следящую за рельефом поверхности Земли ниже этого уровня [2]. Такая система удобна как для работы с данными Reanalysis, так и для учета реального рельефа поверхности Земли. Система уравнений имеет вид

$$\frac{\partial \pi c_i}{\partial t} + \mathbf{L}(\pi c_i) - \operatorname{div} \mu \pi \operatorname{grad} c_i + (\pi \mathbf{B}(\mathbf{c}))_i = f_i,$$

$$i = \overline{1, n}, \quad n \geq 1.$$

Здесь $\mathbf{c} = \{c_i(\mathbf{x}, t), i = \overline{1, n}\} \in Q(D_t)$ – вектор-функция состояния; c_i – концентрации i -й примеси; n – число различных веществ; $\mathbf{f} = \{f_i(\mathbf{x}, t), i = \overline{1, n}\}$ – функции источников; $\mathbf{L}(\mathbf{x}, t)$ – оператор переноса примесей на фоне атмосферных движений со скоростью $\mathbf{u} = (u, v, \dot{\sigma})$ (гравитационное осаждение примесей учитывается в вертикальной составляющей вектора скорости $\dot{\sigma}$); $\mathbf{B}(\mathbf{c})$ – оператор трансформации примесей [5]; π – функция от давления, ее вид зависит от выбора системы координат; $\mu = (\mu_1, \mu_2, \mu_3)$, $\mu_i (i = \overline{1, 3})$ – коэффициенты турбулентного обмена в направлениях координат $x_i (i = \overline{1, 3})$; $D_t = D \times [0, \bar{t}]$; D – область изменения пространственных координат \mathbf{x} , а $[0, \bar{t}]$ – интервал изменения времени; $Q(D_t)$ – пространство функций состояния, удовлетворяющих краевым условиям на границе области D_t . Коэффициенты турбулентности рассчитываются по данным о полях метеозлементов: скорости ветра, температуры, геопотенциала, приземного давления. Горизонтальные коэффициенты μ_1, μ_2 – по аналогии с [6, 7], а вертикальные μ_3 параметризуются, в соответствии с определениями К-теории турбулентности, с учетом температурной стратификации и вертикального сдвига горизонтального вектора скорости.

Граничные условия. На верхней границе воздушной массы ($p = p_T = 10$ мбар) предполагается отсутствие потоков примесей. На нижней границе ($p = p_s(\mathbf{x}, t)$) задаются условия осаждения примесей. Скорости осаждения параметризуются с учетом аэродинамического, молекулярного и поверхностного сопротивления для примесей в газовом и аэрозольном состоянии над термически и орographically неоднородной поверхностью Земли. Так как задача рассматривается на сфере, то по долготе используются условия периодичности всех полей. В полусферном варианте на экваторе предполагается условие отсутствия потоков примесей из южного полушария в северное.

2. Формирование сценариев

Для реализации сценариев моделирования требуется задание полей скорости ветра, температуры, влажности, геопотенциала, приземного давления, потоков солнечного излучения на уровне поверхности Земли. Как уже упоминалось, они рассчитываются по данным Reanalysis NCEP/NCAR с помощью системы, описанной в [4]. Для расчетов нам доступны данные за 38 лет с 1961 по 1998 г. Начальный и конечный моменты временного интервала и шаг дискретизации Δt для интегрирования модели по времени и структура сеточной области определяются при задании входной информации.

Итак, цель сценариев: оценка характера распространения и масштабов областей загрязнения атмосферы Земли примесями, поступающими от источников, возникающих в результате техногенных катастроф и военных конфликтов (в данном случае в результате разрушения экологически опасных объектов на территории Сербии).

Необходимо подчеркнуть, что данные расчеты – это не прогноз и не диагноз конкретной ситуации, а гипотетический сценарий развития событий на фоне реальных атмосферных процессов, реализовавшихся в прошлом. Таким способом мы пытаемся ответить на принципиальный вопрос о масштабах возможной экологической катастрофы.

Были выполнены расчеты нескольких сценариев для одного и того же календарного периода времени в разные годы. Один из первых сценариев, который был представлен на Международной конференции «Физика атмосферного аэрозоля» в Москве 12–17 апреля 1999 г., мы разработали в самом начале конфликта. Никакой текущей метеоинформации, а тем более прогноза, в нашем распоряжении не было. В соответствии с нашей концепцией мы взяли данные об атмосферной циркуляции для периода 12–28 апреля 1996 г. Конечная дата сценария была выбрана произвольно. В действительности конфликт оказался более продолжительным и вышел за рамки выбранного нами интервала времени. Немного позже были рассчитаны сценарии за тот же период по данным 1994 и 1998 гг.

Предполагалось, что агрегированными источниками примеси на территории Сербии могут быть химические и биохимические объекты, нефтеперерабатывающие заводы, нефте- и газохранилища, ядерные реакторы и т.д. Процессы трансформации примесей и механизмы вторичного загрязнения природной среды продуктами трансформации не рассматривались из-за отсутствия информации о составе загрязнителей и о самих механизмах преобразований веществ в атмосфере, хотя принципиальная возможность прогнозирования химической обстановки с помощью нашего комплекса моделей имеется [5]. Представленные в нашей статье результаты относятся к трассерным экспериментам с пассивными примесями.

Поскольку разрушения были связаны с применением взрывчатых веществ, вызывающих пожары, предполагалось также, что выбросы загрязнений сопровождаются интенсивными тепловыми выбросами. Оценка, полученная на основе расчетов с помощью мезомасштабных моделей гидротермодинамики в негидростатическом приближении [7], показывают, что при достаточно длительном поступлении тепла и загрязняющих примесей от такого рода объектов аэрозольные облака с высокотоксичными примесями вместе с нагретыми воздушными массами могут, в зависимости от погодных условий, подниматься за счет конвекции до

высот порядка 5 км над поверхностью Земли и включаться в систему атмосферной циркуляции мезорегионального и глобального масштабов. Поэтому источники примеси задавались распределенными по вертикали до уровня 500 мбар. В сценариях предполагалось, что источники тепла и примесей действуют с 00 ч 12 апреля по 00 ч 29 апреля.

Априорно известной особенностью региона, включающего Сербию, является то, что он находится в зоне влияния Средиземноморского циклогенеза. Она характеризуется высокой интенсивностью и изменчивостью природных процессов, а это значит, что с позиций экологии этот регион относится к объектам высокого экологического риска как для самого себя, так и для окружающих его территорий.

3. Результаты расчетов

Результаты расчета сценариев были визуализированы в виде компьютерных фильмов, в которых были представлены двумерные горизонтальные разрезы полей концентраций примесей на 10 уровнях по вертикали от поверхности Земли до 20 мбар с дискретностью по времени 30 мин. Сравнительный анализ всех сценариев подтверждает, что район находится в зоне интенсивных атмосферных процессов. Тем не менее удастся обнаружить

общие черты в характере распространения загрязняющих веществ. Масштабы областей интенсивных загрязнений и поля суммарных концентраций за весь период моделирования остаются примерно одинаковыми, хотя конфигурации их в пространственно-временной динамике имеют свои специфические особенности.

В настоящей статье представлены результаты расчета сценария по данным за 1998 г. Следует отметить, что преобладающим фактором в этом, как и в других сценариях, является западно-восточный перенос, который чередуется с движениями меридионального направления. На рис. 1, 2 в полярно-стереографической проекции северного полушария изображены фрагменты сценария – двумерные горизонтальные разрезы поля концентраций вблизи поверхности Земли. Рис. 1 относится к 12 ч дня средневропейского времени 15.04.98, а рис. 2 – к 12 ч 26.04.98. Концентрации нормированы на максимальное значение, вычисленное по всем полям по времени. Изолинии на рисунках помечены номерами, изополосы покрашены разными оттенками в черно-белой гамме цветов, шкала значений дана внизу. Для удобства ориентирования на полусфере нанесены контуры материков.

Сравнение рис. 1 и 2 показывает значительную изменчивость полей концентраций, причиной которой является высокая изменчивость гидрометеорологических условий, имевших место в указанный период времени.

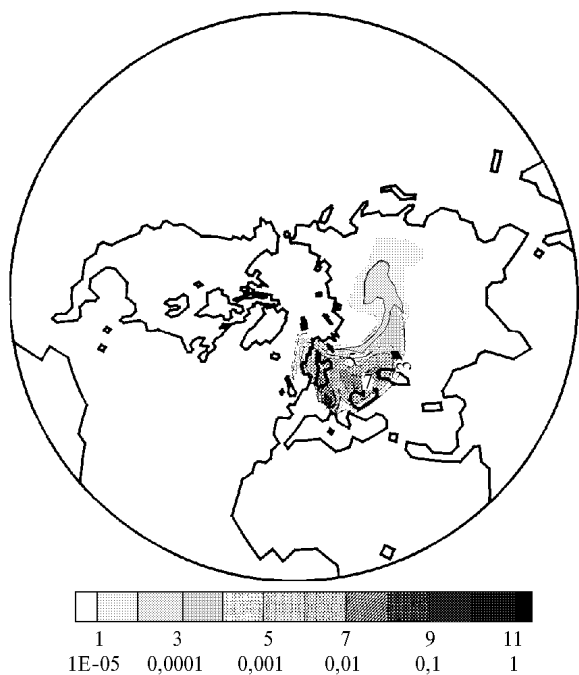


Рис. 1. Поле концентраций вблизи поверхности Земли (15.04.98 г.)

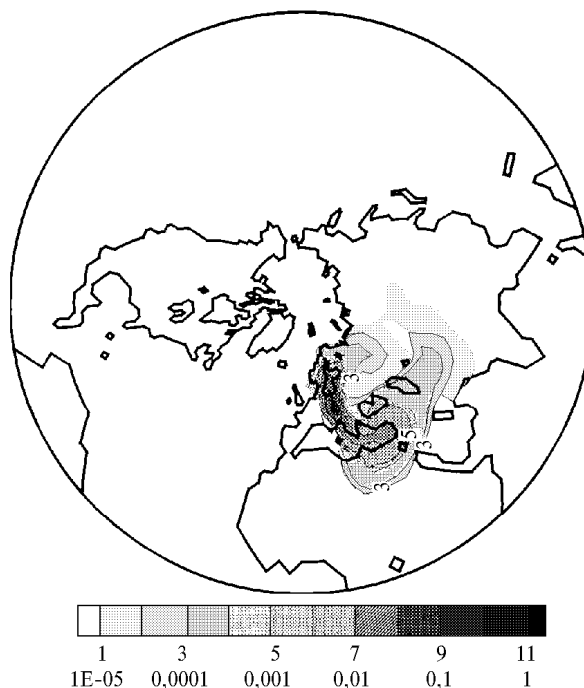


Рис. 2. Поле концентраций вблизи поверхности Земли (26.04.98 г.)

На рис. 3 представлено поле концентраций суммарного загрязнения атмосферы за время действия источников (12–28 апреля) на уровне рельефа поверхности Земли, а на рис. 4 – в стратосфере на уровне 20 мбар. Значения концентраций на этих двух рисунках даны в относительных единицах с нормировкой на максимальное значение трехмерных суммарных полей. Выносы примесей в верхние слои атмосферы осуществляются конвективными движениями. Хотя по величине концентрации примесей в стратосфере малы по сравнению с

максимумом, тем не менее, они значительны для экологических последствий.

Рисунки наглядно демонстрируют большие масштабы распространения загрязнений, рассчитанные в сценариях. Такие явления можно с определенностью классифицировать как крупномасштабную экологическую катастрофу.

Здесь совершенно не затронуты вопросы химического загрязнения и возможность вторичного загрязнения атмосферы из-за процессов трансформации примесей. На самом деле в экологическом плане эти факторы

могут оказаться более существенными для здоровья людей и качества природной среды, чем простое рассеивание примесей в атмосфере. Известно, например, что в результате реакций могут образовываться более токсичные продукты транс-

формации, чем первичные выбросы [5, 7]. О сложности проблемы свидетельствует, например, такой факт, что химические реакции протекают по-разному в зависимости от наличия или отсутствия солнечного света.

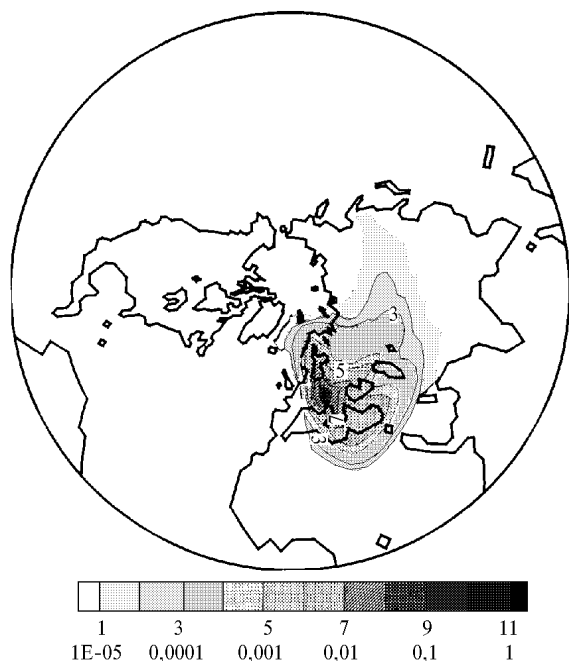


Рис. 3. Суммарная концентрация вблизи поверхности Земли за период 12–28.04.98 г.

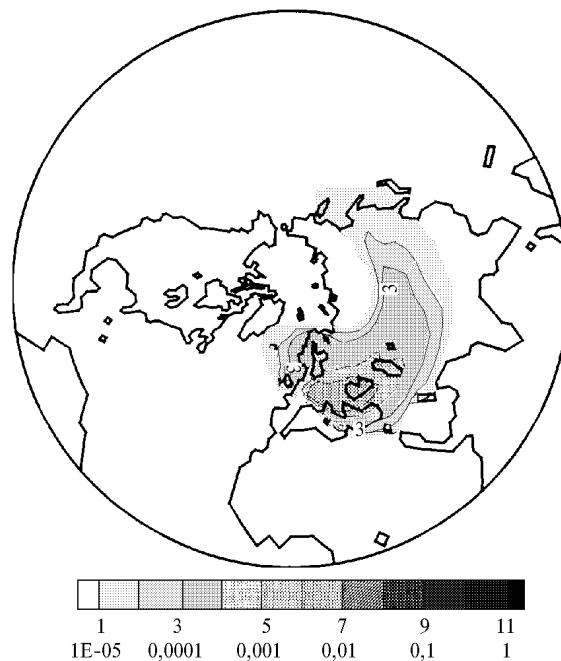


Рис. 4. Суммарная концентрация на высоте 20 мбар за период 12–28.04.98 г.

Таким образом, в настоящей статье сделана попытка лишь обозначить проблему оценки последствий антропогенных воздействий в специфических условиях техногенных катастроф и военных конфликтов и продемонстрировать один из аспектов применения разрабатываемой нами информационно-моделирующей системы.

Выводы

1. Не следует рассчитывать на локализацию областей загрязнения природной среды. По крайней мере региональный масштаб загрязнений обеспечен в случаях сопровождения выбросов загрязнений интенсивными тепловыми выбросами.

2. Если из-за условий катастрофы и особенностей атмосферной циркуляции происходит вынос загрязняющих примесей в стратосферу, размеры областей загрязнения существенно возрастают. Это особенно опасно в случае поражения ядерных реакторов и хранилищ ядерных материалов.

3. В сценариях с Сербией, которая географически расположена в зоне Средиземноморского циклогенеза, практически вся Европа оказалась под антропогенным воздействием.

4. Имеет смысл оценивать трансграничные переносы и возможные ущербы от загрязнений природной среды за счет этих переносов (в наших сценариях, например, для стран СНГ).

5. Характерные масштабы областей загрязнения необходимо оценивать с помощью глобальных моделей, а детали уточнять на мезорегиональных моделях с высоким пространственно-временным разрешением.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 98-05-65318), ИГ СО РАН-97 №30 и Программы перспективных информационных технологий Миннауки России (грант № 0201.06.269/349).

1. Пененко В.В., Цветова Е.А. // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т. 12. № 6. С. 482–487.
2. Пененко В.В., Цветова Е.А. // ПМТФ. 1999. Т.40. №2. С. 137–147.
3. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. et al. // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1996. V. 77. P. 437–471.
4. Пененко В.В., Цветова Е.А. // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т. 12. № 5. С. 463–465.
5. Penenko V.V., Tsvetova E.A., Skubnevskaya G.I. et al. // Chemistry for Sustainable Development. 1997. V. 5. P. 505–510.
6. Smagorinsky J., Manabe S., Holloway J.L., Jr // Mon. Wea. Rev. 1965. V. 93. P. 727–768.
7. Пененко В.В., Алоян А.Е. Модели и методы для задач охраны окружающей среды. Новосибирск: Наука, 1985. 254 с.

V.V. Penenko, E.A. Tsvetova. A Scale analysis of anthropogenic impact in the atmosphere.

A scenario approach is proposed for the preliminary estimation of the scales of possible results of anthropogenic impact on the climatic system. The modeling scenarios presented are realized by means of the hemispheric pollutant transport and transformation model. To be as closer to the reality as possible the Reanalysis NCEP/NCAR data are used for the design of atmospheric circulation scenarios. The results of numerical experiments demonstrating the possible scales of the polluted domains in the atmosphere of the Northern hemisphere by the sources placed in Serbia are presented.