

В.В. Пененко, Л.И. Курбацкая

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ РАДИАЦИОННОГО РЕЖИМА АТМОСФЕРЫ ИНДУСТРИАЛЬНОГО РЕГИОНА К ВАРИАЦИЯМ ОБЛАЧНОСТИ И АЭРОЗОЛЯ

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

Поступила в редакцию 03.03.99 г.

Принята к печати 30.03.99 г.

Представлена методика оценок чувствительности температурного и радиационного режимов атмосферы к вариациям концентраций аэрозольных и газовых загрязняющих примесей в атмосфере промышленных регионов. Для вывода основных соотношений теории чувствительности в состав совместной модели гидротермодинамики атмосферы и переноса примесей в дополнение к радиационному блоку вводятся новые элементы: функционалы для обобщенных оценок состояния атмосферы и соответствующая им сопряженная система уравнений. В результате таких модификаций получаются алгоритмы, позволяющие непосредственно оценить влияние вариаций газового состава атмосферы на состояние системы в целом, описываемое функционалами качества.

1. Введение

Для практических целей часто возникает потребность в количественных оценках тенденций изменения радиационного режима атмосферы в связи с малыми изменениями оптически активных загрязняющих примесей (парниковых газов и аэрозолей), которые могут быть обусловлены совместным влиянием естественных и антропогенных факторов. Такие оценки можно получить с помощью методов теории чувствительности моделей к вариациям входных параметров [1]. В данном случае в качестве обобщенных параметров выступают потоки прямой солнечной радиации, облачность, концентрации газовых составляющих и аэрозолей.

В статье рассматривается задача об исследовании чувствительности мезоклиматов промышленных регионов, где существенно влияние загрязняющих примесей на качество атмосферы, а также заметно их влияние на радиационный режим. Представляется интересным выяснить: возможно ли в такой ситуации вместо «острова тепла», типичного для циркуляции атмосферы над городами, когда температура воздуха над городом выше, чем над окружающими территориями, возникновение эффектов противоположного характера, т.е. «острова холода». Ответ на этот вопрос затруднен тем, что здесь оценки надо получить на уровне малых возмущений, когда трудно выделить отдельный вклад каждого фактора в отдельности.

Имеется несколько способов исследования чувствительности. Один из них – метод прямого моделирования, когда искомая вариация есть разность между двумя решениями с возмущенными и невозмущенными параметрами. Однако при малых вариациях велика вероятность значительных ошибок определения вариации, возникающих из-за разностей больших чисел. Второй способ – определение малых вариаций функционалов от решения, когда выстраиваются соотношения между вариациями входных параметров и вариациями функционалов через функции чувствительности.

2. Прямые оценки чувствительности радиационного режима через вариацию водности

Как и в [2], используется мезорегиональная модель гидротермодинамики атмосферы в квазистатическом при-

ближении на ограниченной территории. Радиационный блок в рамках этой модели дополнен описанием облачности [3], которое предусматривает расчет поля облачности (количество облаков определяется для любого из рассматриваемых слоев) путем задания критической относительной влажности, зависящей от высоты и являющейся точкой отсчета начала образования облаков, количество которых c_n оценивается по соотношениям, полученным на основе данных наблюдений.

Используемые формулы типичны для слоистой облачности, имеющей большую протяженность по пространству и достаточно большое альbedo (40–70%), что приводит к изменению радиационного баланса не только слоя, содержащего облачность, но и поверхности Земли. В нашей модели рассматриваются облака нижнего и среднего ярусов, а ее балл рассчитывается с помощью следующих соотношений [5]:

$$c_m = \begin{cases} (r - 65)^2/1225 & \text{при } r \geq 65, \\ 0 & \text{при } r < 65, \\ c_l = \begin{cases} (r - 80)^2/400 & \text{при } r \geq 80, \\ 0 & \text{при } r < 80. \end{cases} \end{cases}$$

Здесь c_m и c_l – балл облачности среднего и нижнего ярусов; r – относительная влажность. При наличии облачности результирующие потоки длинноволновой и коротковолновой радиации представляют сумму соответствующих потоков (F^{\uparrow} , F^{\downarrow} – восходящих и нисходящих соответственно для ясного и облачного неба). Водность облаков в рассматриваемом слое определяется следующим соотношением:

$$L = \gamma c_n q,$$

где L – водность; γ – эмпирический параметр, полученный из данных наблюдений; q – удельная влажность. Параметр γ позволяет варьировать содержание водности в облаке, что дает возможность рассматривать облака с малой водностью ($\gamma = 0,0002$, с водностью, наблюдаемой в реальных условиях в слоистых облаках типа Sc , As ($\gamma = 0,002$) и с большим содержанием водности ($\gamma = 0,2$).

Облака, описываемые радиационной моделью, характеризуются двумя основными оптическими парамет-

рами, связанными с его водностью: отражательной и пропускательной способностью коротковолнового излучения. С увеличением водности облака при неизменных других параметрах модели (температура, влажность, давление) наблюдается тенденция к увеличению отражательной (уменьшению пропускательной) способности облака, которая наиболее сильно проявляется для облаков среднего яруса. При задании $\gamma = 0,002; 0,01; 0,02$ соответственно отражательная способность облаков нижнего яруса равна 56, 85, 91%; среднего – 31, 71, 82% и верхнего яруса – 2, 9, 18%.

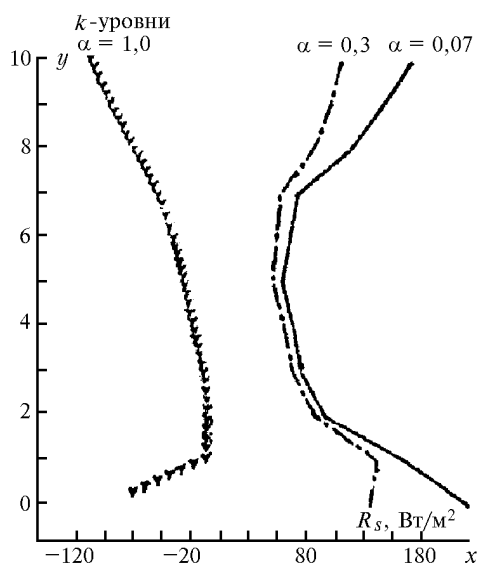


Рис. 1

На рис. 1 изображены профили радиационного баланса на поверхности Земли в зависимости от высоты облачности и альbedo подстилающей поверхности. По оси x даны значения радиационного баланса R_s , Вт/м², по оси y – номер расчетного уровня, на котором задается балл облачности. В точке $k = 0$ нанесено значение радиационного баланса на поверхности Земли для ясной атмосферы при различных альbedo, $k = 10$ – высота 9 км. Видно, что величина радиационного баланса на поверхности Земли R обусловлена двумя факторами: альbedo подстилающей поверхности α и высотой облачности. При $\alpha = 1$ (когда падающая солнечная суммарная радиация целиком отражается) R имеет отрицательное значение и увеличивается по абсолютной величине с поднятием облачности. При $\alpha = 0,3; 0,07$ кривые близки друг к другу. Это означает, что при наличии облаков альbedo поверхности Земли менее значимо, чем в ситуации безоблачного неба, когда при $\alpha = 0,07$ R на 100 Вт/м² больше, чем при $\alpha = 0,3$.

На рис. 2 приведено поле разности температур в установившемся режиме для сценариев с учетом взаимодействия радиационных процессов с облачностью $T_{обл}$ и без учета взаимодействия T на высоте 600 м над рельефом подстилающей поверхности (поверхность $\sigma = 0,2$).

Разность температур для облачной и безоблачной атмосферы, усредненная по пространственным переменным на уровне задания облачности, составляет $-0,62^\circ\text{C}$.

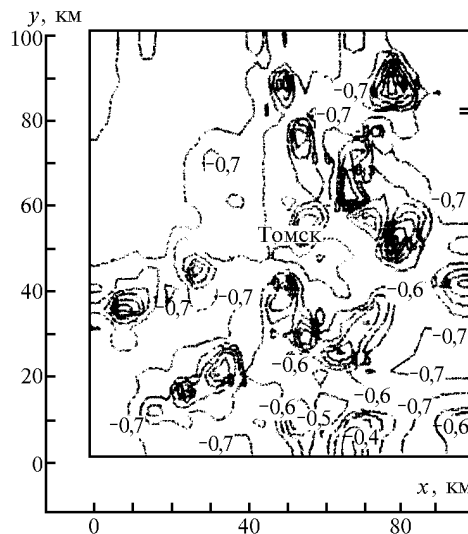


Рис. 2

3. Построение соотношений чувствительности для обобщенных оценок радиационного режима

Для вывода основных соотношений теории чувствительности в состав модели в дополнение к радиационному блоку вводятся новые элементы: функционалы для обобщенных оценок состояния атмосферы и соответствующая им сопряженная система уравнений.

Представим схему алгоритма для расчета соотношений чувствительности на примере системы уравнений, включающей: уравнения переноса тепла и примесей (аэрозолей, парниковых газов и водяного пара) в атмосфере и уравнения расчета радиационных притоков тепла [3–7].

Для компактного представления основных этапов алгоритма воспользуемся операторной формой записи уравнений:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \Lambda T - BR = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \Lambda C - Q_C = 0, \quad (2)$$

$$R - \tau F_0 = 0, \quad (3)$$

$$A \times F_0 - S_0 = 0. \quad (4)$$

Здесь T – температура; $C = \{C_i, i = \overline{1, n}\}$, C_i – концентрации примесей; n – число различных субстанций; Λ – дискретный аналог адвективно-диффузионного оператора переноса; Q_C – источники примесей; B – оператор расчета притока тепла; вектор потоков $R = (F^\uparrow, F^\downarrow, F_p)$; F^\uparrow – потоки вверх; F^\downarrow – потоки вниз, F_p – параллельный поток прямой солнечной радиации, F_0 – вектор потоков без учета поглощения радиации парниковыми газами; S_0 – поток солнечной радиации на верхней границе атмосферы; τ – диагональный оператор, составленный из функций пропускания парниковых газов; A – матричный оператор, коэффициенты которого зависят от оптических свойств атмосферы: однократного альbedo рассеяния ω , оптической толщины слоя Δ и индикатрисы рассеяния, характеризующейся фазовыми

множителями A_1 , A_2 и $A_3(\mu)$, $A_4(\mu)$, связанными между собой соотношениями $A_1 + A_2 = 1$, $A_3(\mu) + A_4(\mu) = 1$.

Алгоритмы теории чувствительности построены по методике, описанной в [1, 8]. Для этих целей определим функцию состояния и сопряженные к ней функции в виде

$$\Phi = (T, C, R, F_0) \text{ и } \Phi^* = (T^*, C^*, R^*, F_0^*)$$

и запишем вариационную формулировку модели (1)–(4) с помощью интегрального тождества. Оцениваемый функционал обозначим через $\Phi^h(\Phi)$. Интегральное тождество для такой комплексной модели представлено в [4].

Учитывая «одномерную» специфику радиационного блока, систему уравнений (1) – (4) и все построения для упрощения выкладок можно рассматривать только по вертикальной координате, предполагая при этом параметрическую зависимость от горизонтальных координат. Тогда, опуская все промежуточные преобразования, приведем окончательные результаты.

Система сопряженных уравнений:

$$-\left[\frac{\partial T^*}{\partial t}\right]^h + \Lambda^T T^* + \frac{\partial \Phi^h(\Phi)}{\partial T} = 0, \quad T^*(x, \bar{t}) = 0, \quad (5)$$

$$-\left[\frac{\partial C^*}{\partial t}\right]^h + \Lambda^T C^* + \left(\frac{\partial \tau}{\partial C} F^*, \Phi^*\right) + \left(\frac{\partial A}{\partial C} F_0, F_0^*\right) + \frac{\partial \Phi^h(\Phi)}{\partial C} = 0,$$

$$C^*(x, \bar{t}) = 0, \quad (6)$$

$$B^T T^* - R^* = 0, \quad (7)$$

$$\tau^T R^* - A^T F_0^* = 0. \quad (8)$$

Здесь верхний индекс T обозначает операцию транспонирования, а индекс h – дискретные аналоги.

В уравнениях (5)–(6) источниками служат производные оцениваемого функционала по сеточным компонентам функции состояния. Третье и четвертое слагаемые в (6) учитывают тенденции изменений операторов τ и A из радиационного блока (3), (4) относительно компонент вектора концентраций оптически активных примесей. Дифференцирование этих квадратичных форм также осуществляется по сеточным компонентам вектора C . Заметим, что уравнение (6) представляет собой новую форму сопряженного уравнения в составе модели переноса примесей. В ней содержатся дополнительные слагаемые, учитывающие информацию о влиянии изменений качества атмосферы на радиационные процессы.

Уравнения (7), (8) представляют собой систему, сопряженную по отношению к уравнениям радиационного блока (3), (4). Система (5)–(8) решается в следующей последовательности: (5), (6), (7), (8).

Соотношение чувствительности

$$\delta \Phi(\Phi) = (\delta B R, T^*) + (\delta S_0, F_0^*) + (\delta Q_C^*, C^*) - [(\delta C, C^*) + (\delta T, T^*)]_{t=0}, \quad (9)$$

V.V. Penenko, L.I. Kurbatskaya. Investigation of Sensitivity of Atmospheric Radiation Regime over Industrial Region to Variations of Cloudiness and Aerosol.

A method for estimation of sensitivity of temperature and radiation regimes in the atmosphere of industrial regions to variation of aerosol and gas pollutants concentrations is presented. The basic sensitivity relationships for a combined model of atmospheric hydrodynamics and pollutant transfer are obtained. In addition to a radiation block, some new elements are introduced, namely functionals of generalized estimates of the atmospheric behaviour and the corresponding system of adjoint equations. The physical system under study is described by generalized quality functions. New algorithms for direct estimation of an impact of the atmospheric gas content on the system as a whole are proposed.

где символ δ обозначает вариации соответствующих объектов. В (9) опущены слагаемые, получающиеся при варьировании соотношений интегрального тождества, учитывающих граничные условия. Они вычисляются обычным способом. Формула (9) интересна тем, что все внутренние зависимости между вариациями концентраций оптически активных примесей с радиационными процессами учитываются через значения сопряженных функций. Окончательно в формуле (9) проявились только внешние по отношению к модели факторы. Правая часть соотношения (9) включается как дополнительное слагаемое в общее соотношение чувствительности базовой модели при учете влияния вариаций притоков тепла [9].

4. Заключение

Радиационные процессы являются индикаторами взаимосвязей в климатической системе между термодинамикой и изменениями состава атмосферы. Известно, что такое взаимодействие несимметрично, в том смысле, что динамика атмосферы реагирует на изменения качества воздуха с запаздыванием, опосредованно, через радиационный режим. С этих позиций соотношения теории чувствительности имеют принципиальное значение. Они дают представление о тенденциях влияния малых изменений мощности источников эмиссии примесей на изменение целевых функционалов. Эти оценки получаются на основании расчетов с параметрами невозмущенного состояния атмосферы и источников.

При таком подходе эффекты запаздывания учитываются во внутренних информационных связях в модели через решения соответствующих сопряженных задач и через функции чувствительности. С их помощью вариации функционалов оцениваются непосредственно, через вариации входных данных. Такая информация дает основу для выявления предпосылок возникновения экологически неблагоприятных ситуаций, обусловленных взаимодействием радиационных процессов с загрязнением атмосферы, по данным об источниках эмиссии.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты 97-05-96511, 98-05-65318, и Программы интеграционных исследований СО РАН (ИГ СО РАН-97 N 30).

1. Пененко В.В. Методы численного моделирования атмосферных процессов. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 351 с.
2. Пененко В.В., Курбацкая Л.И. // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. N 6. С. 581–588.
3. Пененко В.В., Курбацкая Л.И. // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11. N 6. С. 581–585.
4. Пененко В.В., Цветова Е.А. // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11. N 6. С. 586–593.
5. Slingo J., Ritter B. // ECMWF Technical Report. 1985. N 46. 49 p.
6. Geleyn J.F., Hollingsworth A. // Contributions to Atmospheric Physics. 1979. V. 52. N 1. P. 1–16.
7. A preliminary cloudless standard atmosphere for radiations computation. WMO/TD 24. 1986. WCP. P. 112.
8. Penenko V.V., Tsvetova E.A. // Bull. NCC. Num. Model. in Atmosph. 1995. N 2. P. 53–74.
9. Пененко В.В. // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т. 12. N 5. С. 458–462.