

В.В. Пененко, Л.И. Курбацкая

## ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ «ОСТРОВА ТЕПЛА» С УЧЕТОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАДИАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ С АЭРОЗОЛЯМИ

Дается описание радиационного блока, адаптированного к мезорегиональной модели атмосферы, используемой для исследования условий формирования мезоклиматов индустриальных регионов. Приведены результаты численных экспериментов, иллюстрирующие влияние неоднородностей распределения аэрозолей и малых газовых составляющих в атмосфере на структуру полей метеоэлементов, обусловленное изменениями радиационных притоков тепла.

### 1. Введение

Цель настоящей работы состоит в реализации радиационного блока в рамках мезорегиональной модели гидротермодинамики атмосферы в квазистатическом приближении на ограниченной территории для оценок характерных масштабов влияния неоднородностей радиационных потоков тепла на динамику мезоклиматов [1]. Исследуются атмосферные процессы в индустриальных регионах, типичных для условий юга Сибири.

Основными источниками неоднородностей подстилающей поверхности, влияющих на формирование мезоклиматов, выступают городские «острова тепла» и контрасты температуры типа «вода–суша» с сезонными и суточными изменениями знака, которые для внутренних водоемов проявляются как «острова» тепла или холода.

Радиационный блок описывает процессы длинноволнового и коротковолнового излучения в атмосфере с учетом малых газовых составляющих (водяной пар, углекислый газ, метан, озон) и аэрозолей, обусловленных естественными и антропогенными факторами, действующими в климатической системе [2, 3].

В реальных условиях поля концентраций атмосферных примесей изменчивы во времени и в пространстве по своим оптическим свойствам, химическому составу и микроструктуре, и это обстоятельство затрудняет получение таких оценок. Поэтому для организации сценариев моделирования специально формировались оптимально консервативные ситуации: задавались стандартные аэрозольные модели, каждая из которых наиболее типична для того или иного района рассматриваемой области. Состав аэрозоля ограничивается тремя основными компонентами: сажей, пылью и водорастворимыми частицами. Наиболее загрязненными районами считаются населенные пункты и город, где повышено содержание сажи. Над полями, болотами и водной поверхностью в весенний и летне-осенний периоды преобладающим компонентом задается пыль.

### 2. Структура радиационного блока

Модель для расчета радиационных потоков тепла основана на системе дифференциальных уравнений переноса излучения в двухпоточковом приближении Эддингтона для горизонтально однородной атмосферы [2]. В коротковолновой области спектра излучения присутствуют: параллельный поток прямой солнечной радиации ( $S$ ) и потоки нисходящей ( $F^\downarrow$ ) и восходящей ( $F^\uparrow$ ) рассеянной радиации, а в длинноволновой области спектра – потоки восходящей ( $F^\uparrow$ ) и потоки нисходящей ( $F^\downarrow$ ) радиации. Для построения параметризационных формул атмосфера по вертикали разбивается на  $n$  слоев, а оптические свойства атмосферы предполагаются кусочно-постоянными в пределах каждого слоя. При таких предположениях система дифференциальных уравнений переноса интегрируется аналитически в пределах слоя, и в результате получается система дискретных уравнений, связывающих значения искомым потоков на границах ячеек:

$$\begin{pmatrix} a_1 & 0 & 0 \\ a_2 & a_4 & a_5 \\ a_3 & a_5 & a_4 \end{pmatrix}_j \begin{pmatrix} F_p^t \\ F_d^t \\ F_u^b \end{pmatrix}_j = \begin{pmatrix} F_p^b \\ F_p^b \\ F_u^a \end{pmatrix}_j \quad j = \overline{1, n}. \quad (1)$$

Здесь  $F_p \equiv S$  – направленный вниз параллельный поток солнечной радиации;  $F_d \equiv F^\downarrow$  – направленный вниз поток рассеянной коротковолновой радиации;  $F_u \equiv F^\uparrow$  – направленный вверх поток рассеянной радиации (индексом  $b$  отмечены значения на нижней, а индексом  $t$  на верхней границах слоев);  $a_{1j}, a_{2j}, a_{3j}$  – коэффициенты пропускания, диффузионного пропускания и диффузионного отражения параллельных солнечных лучей;  $a_{4j}, a_{5j}$  – коэффициенты пропускания и отражения рассеянной радиации соответственно для слоя с номером  $j$ . Коэффициенты  $a_{ij} \equiv a_{ij}(\delta\tau, \omega, \tilde{\beta}, \mu_0, \beta(\mu_0))$  вычисляются аналитически;  $\delta\tau$  – оптическая толщина слоя;  $\omega$  – альбеда однократного рас-

сеяния;  $\mu_0$  – зенитный угол Солнца;  $\beta(\mu_0)$  – функция рассеяния вперед для параллельных солнечных лучей;  $\tilde{\beta}$  – функция обратного рассеяния для диффузных лучей.

Система (1) содержит  $3n$  уравнений с  $3(n+1)$  искомыми значениями потоков. Для ее замыкания задаются граничные условия: для коротковолновой радиации на верхней границе атмосферы:

$$\begin{aligned} F_p(0) &= \mu_0 S_0, \\ F_d(0) &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

и на нижней

$$F_u(g) = A_g(\mu_0)F_p + A_g F_d. \quad (3)$$

Здесь  $S_0$  – солнечная постоянная на верхней границе атмосферы;  $A_g(\mu_0)$ ,  $A_g$  – альbedo поверхности Земли для коротковолновой прямой и рассеянной радиации соответственно.

Система линейных уравнений (1)–(3) решается с помощью процедуры исключения Гаусса для ленточных матриц. Аналогичная система уравнений, но с блочными матрицами  $2 \times 2$ , получается и для длинноволновых потоков, которая содержит  $2(n+1)$  неизвестных. Граничные условия для длинноволновых потоков на верхней границе атмосферы:

$$F_d = \pi B,$$

на нижней границе:

$$F_u = (1 - E_g)F_d,$$

где  $E_g$  – излучательная способность Земли.

В данной работе в отличие от [2, 3] кроме рэлеевского рассеяния, рассеяния и поглощения аэрозолем (частицы которого соизмеримы с молекулами воздуха) и облаками (при их наличии) дополнительно вводится аэрозоль [4–6] с достаточно большой оптической массой и состоящий из нескольких компонентов, таких как сажа, пыль, водорастворимый аэрозоль, и оценивается влияние таких аэрозолей на излучение, а следовательно, и на радиационные потоки тепла (коротковолновые и длинноволновые). Таким образом, в слое рассчитываются суммарная оптическая толщина  $\tau_{\Delta z}$  [6, 7], спектральное альbedo  $\omega$  и коэффициенты индикатрисы рассеяния  $\beta$ ,  $\beta(\mu_0)$  в зависимости от коэффициента ослабления  $\beta_v$ , равно- го сумме коэффициентов рассеяния  $\sigma_v$  и поглощения  $k_v$  отдельных компонентов, содержащихся в слое:

$$\delta\tau \equiv \tau_{\Delta z} = \sum_{\alpha=1}^m \int_z^{z+1} \beta_{v,\alpha} dz, \quad (4)$$

где индекс  $\alpha$  относится к оптической массе отдельных загрязнителей;  $m$  – число ослабляющих излучение субстанций.

Функция пропускания слоя  $\psi$ , характеризующая ослабление коротковолновых и длинноволновых потоков радиации заданным аэрозолем, определяется соотношением  $\psi = \exp(-\tau_{\Delta z})$ .

Схема расчета радиационных потоков состоит из двух этапов. На первом этапе учитываются процессы рэлеевского рассеяния и процессы поглощения и рассеяния излучения облаками (при их наличии) и аэрозолями, которые дополнительно вводятся в радиационную модель. После завершения первого этапа получают значения потоков (коротковолновых и длинноволновых), претерпевших изменения за счет радиационных процессов, перечисленных выше. На втором этапе учитывается поглощение излучения газами ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $O_3$ ). Для этого вводится специальная процедура вычисления функции пропускания в различных частотных интервалах, на которые разбивается рассматриваемый спектр излучения. В данном случае коротковолновый спектр разбит на два интервала, а длинноволновый, соответственно, на три интервала.

Радиационная модель реализуется как одномерная по вертикали в области  $0 \leq p \leq P_s$ ,  $P_s = P_s(x, y, t)$  – приземное давление;  $x, y, t$  – горизонтальные координаты и время в каждой точке горизонтальной сетки модели гидродинамики атмосферы. Горизонтальная однородность оптических свойств атмосферы, постулируемая выше, принимается в пределах одной горизонтальной ячейки, т.е. оптические свойства атмосферы задаются кусочно-постоянными функциями, параметрически зависящими от координат  $x, y, t$ .

### 3. Результаты численных экспериментов

Для организации численных экспериментов рассматривались ситуации с различным составом оптически активных компонентов в атмосфере. Их относительное содержание (в процентах) и соответствующие оптические свойства задавались как входные параметры. В сценариях моделирования варьировалась оптическая толщина атмосферы, которая предполагалась линейно связанной с коэффициентами рассеяния и поглощения.

Вертикальные распределения основных газовых составляющих атмосферы задавались в интервале  $[0 \leq p \leq P_s]$  в каждом узле горизонтальной сетки. В нижних слоях, до высоты 3 км над рельефом, они дополнялись распределениями аэрозольных и малых газовых составляющих. Поскольку исследования проводились для атмосферы индустриального региона, то по горизонтали в каждом узле сетки области состав аэрозольной модели формировался в зависимости от типа подстилающей поверхности в соответствии с категориями землепользования. Расчеты проводились для той же области и с той же входной информацией, что и в статье [1].

Наиболее загрязненные участки области – это территории, занятые городом и поселками. Поэтому в соответствующих им узлах сетки формировались

вертикальные распределения аэрозоля индустриального типа, в котором содержится большое количество сажи. Наиболее чистыми считаются территории, занятые лесами и болотами. В узлах сетки, соответствующих полям, формировались распределения аэрозоля континентального типа с большим содержанием пыли в слое от поверхности земли до высоты 1,5 км над рельефом.

Чтобы в экспериментах исключить влияние облачности, которое является существенным на фоне всех других радиационных процессов, учитываемых в радиационной модели, распределение водяного пара по высоте задается таким, чтобы относительная влажность не превышала 50% по всей высоте атмосферы. Это ограничение позволяет оценить влияние аэрозолей в чистом виде, поскольку оно не позволяет моделировать облачность, которая образуется при относительной влажности выше заданной [8].

В таблице приведены рассчитанные потоки прямой и рассеянной (нисходящей и восходящей) солнечной радиации на верхней границе и на поверхности земли для двух видов аэрозольных моделей: индустриальной и континентальной, описанных в [5, 6], и безаэрозольной модели.

Все исходные для сценариев моделирования ситуации отличаются друг от друга как по содержанию компонентов аэрозоля, так и по их оптическим свойствам: индустриальный аэрозоль насыщен сажей (21%), а континентальный характеризуется повышенным содержанием пыли. Сравнение этих двух типов аэрозолей проводилось при прочих равных условиях, т.е. распределения температуры, влажности и давления по высоте задавались одними и теми же. Альbedo на поверхности земли равнялось 0,3, зенитный угол задавался равным 0,9167, и следовательно, солнечная радиация, поступающая на верхнюю границу атмосферы, получалась равной 1272 Вт/м<sup>2</sup>.

Различия в составе и свойствах аэрозолей сказываются на поведении потоков солнечной прямой и рассеянной радиации. Например, индустриальный аэрозоль из-за наличия сажи обладает большей поглощательной способностью по сравнению с континентальным, и естественно, выделенный слой с таким аэрозолем будет нагреваться за счет поглощения солнечной радиации (в основном, прямой). В свою очередь, континентальный аэрозоль обладает рассеивающей способностью, поэтому приходящая солнечная радиация в рассматриваемом слое в большей мере будет рассеиваться, чем поглощаться, однако эффект нагревания в слое также присутствует, но выражен слабее.

Что касается длинноволновой радиации, то выхолаживание за счет континентального аэрозоля гораздо сильнее, чем за счет индустриального. Поведение потоков для других аэрозольных моделей получается аналогичным, и отличие одной модели от другой проявляется главным образом в интенсивно-

сти потоков прямой и рассеянной радиации [8], приходящей на поверхность земли.

Типы аэрозольных моделей	Потоки на $h = 3000$ м	Потоки на уровне поверхности земли
Индустриальный аэрозоль		
$F_p^\downarrow$	926,85	400,70
$F_d^\downarrow$	83,39	112,96
$F_u^\uparrow$	-163,61	-118,04
$F_{ef}$	846,64	395,62
$\Delta F_{ef}$	-	451,02
Континентальный аэрозоль		
$F_p^\downarrow$	926,25	307,93
$F_d^\downarrow$	100,89	248,51
$F_u^\uparrow$	-307,33	-139,20
$F_{ef}$	720,42	417,24
$\Delta F_{ef}$	-	303,18
Ясная атмосфера		
$F_p^\downarrow$	946,85	841,49
$F_d^\downarrow$	75,55	105,15
$F_u^\uparrow$	-208,28	-208,27
$F_{ef}$	813,48	738,37
$\Delta F_{ef}$	-	75,11

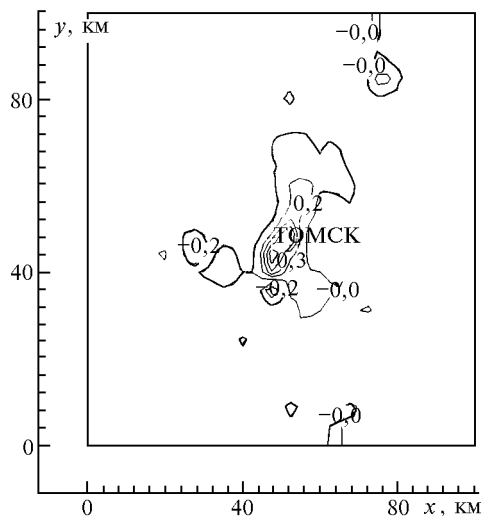
Примечание.  $F_{ef}$  – эффективный поток радиации на заданном уровне;  $\Delta F_{ef}$  – разность потоков на границах нижнего трехкилометрового слоя атмосферы.

Следует отметить, что притоки тепла, обусловленные длинноволновой радиацией, реагируют наиболее сильно на континентальный аэрозоль [7]. По мере увеличения пылевого компонента усиливается выхолаживание слоя, в котором он содержится. Однако суммарный эффект выхолаживания рассматриваемого слоя за счет длинноволнового излучения и нагревания за счет коротковолнового излучения незначителен. И в этом смысле несбалансированным является эффект, вызываемый индустриальным аэрозолем, который способствует сильному нагреванию слоя за счет поглощения коротковолнового излучения сажей.

Сравнительный анализ результатов численных экспериментов позволяет сделать вывод о том, что существование индустриального аэрозоля приводит к увеличению температуры в слое с повышенным содержанием аэрозоля за счет поглощения коротковолновой радиации сажей, а на нижних расчетных уровнях намечается тенденция к уменьшению температуры. Наличие континентального аэрозоля также приводит к увеличению температуры атмосферы, но более слабому. В той же части области, где применялась безаэрозольная модель, изменение температуры было незначительным.

Остается отметить, что наличие того или иного аэрозоля влияет также на радиационный баланс поверхности земли, о чем можно судить из таблицы. На рисунке приведена разность температур при наличии аэрозоля и без него. Видно, что наибольшая разность температур характерна для той части рассматриваемой области, где находятся узлы сеточной

области, относящиеся к городу. Следовательно, учет аэрозолей в радиационной модели приводит к усилению эффекта «острова тепла» над городом за счет изменения коротковолновых притоков тепла.



Поле разности температур в установившемся режиме для сценариев с учетом взаимодействия радиационных процессов с аэрозолями  $T_a$  и без учета взаимодействия  $T$  на высоте 300 м над рельефом подстилающей поверхности (поверхность  $\sigma = 0,1$ )

#### 4. Заключение

Проведенные эксперименты показывают, что влияние аэрозолей на термодинамику атмосферы индустриальных регионов может быть существенным.

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

Поступила в редакцию  
4 февраля 1998 г.

*V.V. Penenko, L.I. Kurbatskaya.* **Investigation of «Heat Island» Dynamics Taking into Account Interconnection between Radiation Processes and Aerosols.**

Radiation part of the meso-regional atmospheric model which is used for the investigation of meso-climate formation in industrial regions is described. The results of numerical experiments illustrate the influence of heterogeneous distribution of aerosols and trace gases due to the changes of radiative heat fluxes on the structure of meteorological fields.

Это значит, что в математических моделях для прогностических и диагностических исследований необходимо обязательно учитывать взаимодействие солнечной радиации с аэрозолем и оптически активными газами. Их влияние по-разному проявляется в конкретных ситуациях, а поскольку при разнообразии взаимодействующих факторов в климатической системе нельзя однозначно оценить роль того или иного фактора, радиационный блок должен быть достаточно универсальным по функциональному назначению и эффективным в реализации.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 97-05-96511) и интеграционного гранта ИГ СО РАН-97 № 30.

1. Пененко В.В., Курбацкая Л.И. // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. № 6. С. 581–588.
2. Geleyn J.F., Hollingworth A. // Beitr. Phys. Atmosph. 1979. V. 52. N 1. P. 1–16.
3. Курбаткин Г.П., Курбацкая Л.И. Исследование чувствительности радиационных притоков тепла к учету облачности. Новосибирск, 1986. 33 с. (Препринт / ВЦ СО РАН, № 686).
4. Крупчатников В.Н., Курбацкая Л.И. // Численные модели в задачах физики атмосферы и охраны окружающей среды. Новосибирск, 1987. С. 48–60.
5. A preliminary cloudless standart atmosphere for radiations computation //WMO/TD-24. 1986. WCP. 112.
6. Крупчатников В.Н., Курбацкая Л.И. // Численное моделирование для задач динамики атмосферы и охраны окружающей среды. Новосибирск, 1989. С. 55–66.
7. Крупчатников В.Н., Курбацкая Л.И. // Гидродинамические модели окружающей среды. Новосибирск, 1990. С. 60–67.
8. Tody N.C., Stanley G.B. Radiative heating rates for Saharan dust // J. Atm. Sci. 1980. V. 37. P. 193–213.