

УДК 551.511

Г.С. Ривин, П.В. Воронина

**ПЕРЕНОС АЭРОЗОЛЯ В АТМОСФЕРЕ: ИМИТАЦИОННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ**

Описан имитационный эксперимент с моделью переноса атмосферного аэрозоля с реальными метеорологическими данными для Сибирского региона на основе монотонной конечно-разностной схемы и однопараметрической модели пограничного слоя атмосферы.

Для изучения миграции аэрозолей, проведения экологических экспертиз и экспертных оценок в рамках проекта «Аэрозоли Сибири» [1] в ИВТ СО РАН [2] разрабатывается система МАР моделирования атмосферных процессов и переноса примесей в Сибирском регионе.

Уравнение, описывающее распространение примеси в атмосфере в системе координат  $(x, y, p)$ , представим в следующем виде:

$$\frac{\partial \varphi_i}{\partial t} + u \frac{\partial \varphi_i}{\partial x} + v \frac{\partial \varphi_i}{\partial y} + (\tau - \tau_g) \frac{\partial \varphi_i}{\partial p} = \frac{\partial}{\partial x} K_x \frac{\partial \varphi_i}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K_y \frac{\partial \varphi_i}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial p} K_p \frac{\partial \varphi_i}{\partial p} + C_i + P_i + S_i, \quad (1)$$

где  $\varphi_i$  – объемная концентрация  $i$ -го ингредиента;  $u, v, \tau$  – компоненты скорости ветра;  $\tau_g$  – скорость гравитационного осаднения аэрозолей;  $K_x, K_y$  – коэффициенты горизонтальной диффузии;  $K_p$  – коэффициент

вертикальной диффузии;  $C_i$  – член, учитывающий химические превращения;  $P_i$  – член, учитывающий вымывание осадками примесей;  $S_i$  – источник выброса  $i$ -го ингредиента.

В качестве начального и граничных условий на нижней и верхней границах области определения  $D$  функций  $\varphi_i(x, y, p, t)$  используем, соответственно, следующие:

$$\varphi_i|_{t=0} = g_i(x), \quad (2)$$

$$K_p \frac{\partial \varphi_i}{\partial p} - \beta \varphi_i = 0, \quad (3)$$

$$\varphi_i = 0, \quad (4)$$

где  $g_i$  – известные функции;  $\beta$  – параметр, характеризующий взаимодействие примеси с подстилающей поверхностью.

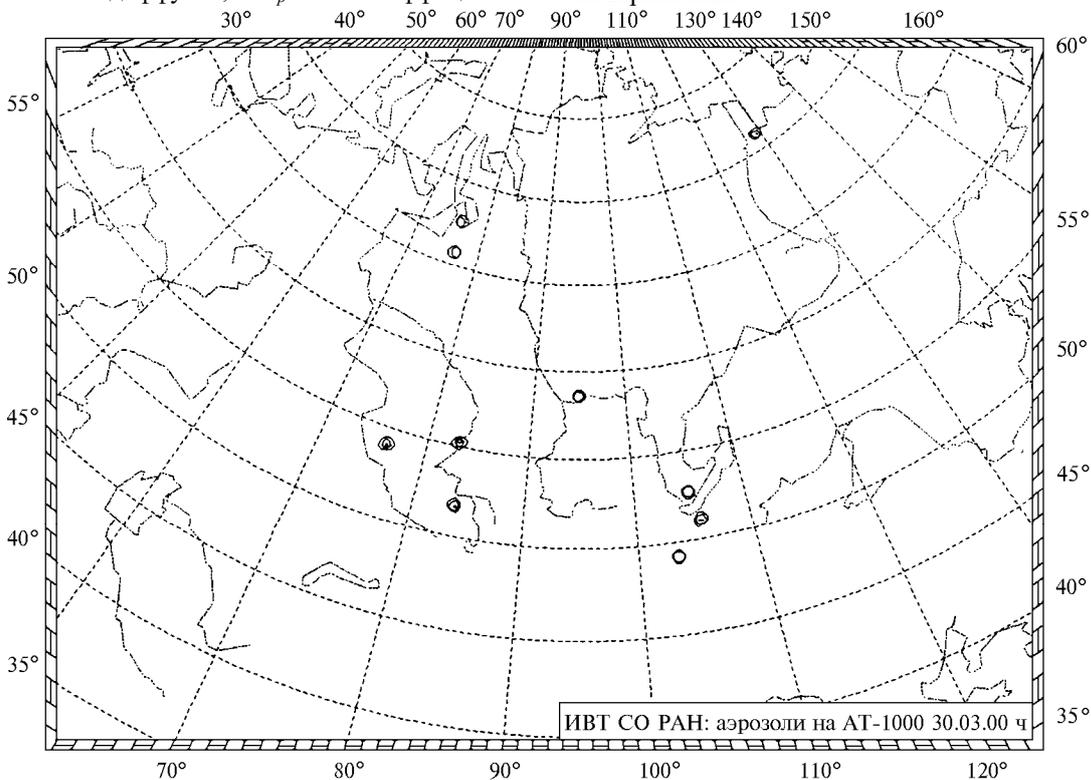


Рис. 1. Сеть мониторинга аэрозолей Сибири

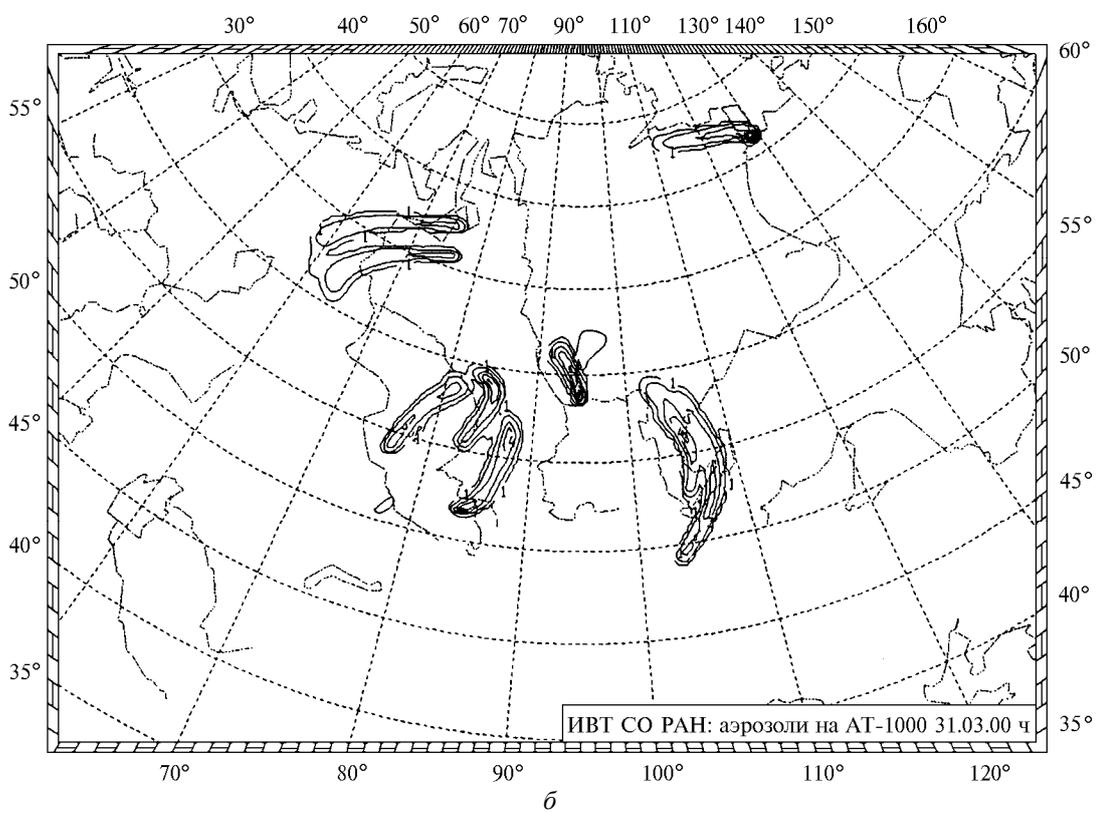
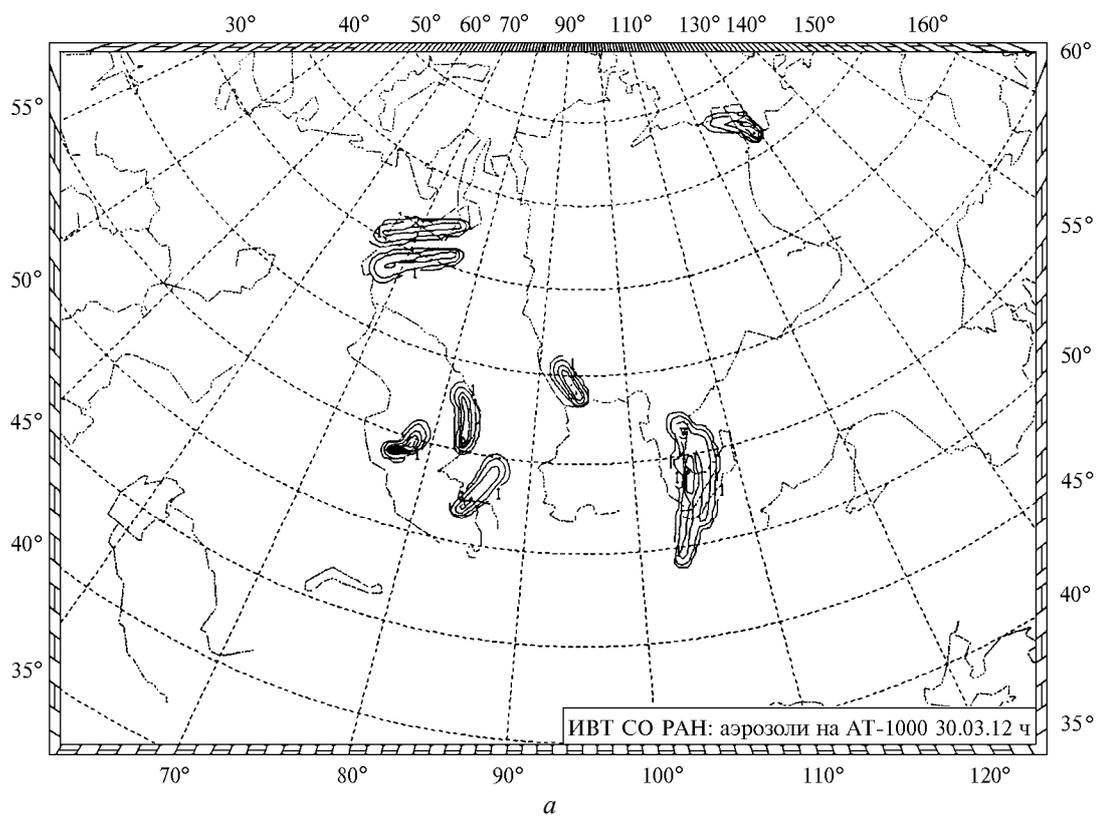


Рис. 2. Поля концентрации аэрозоля на поверхности 1000 гПа для моментов времени: *a* – 12 ч; *b* – 24 ч

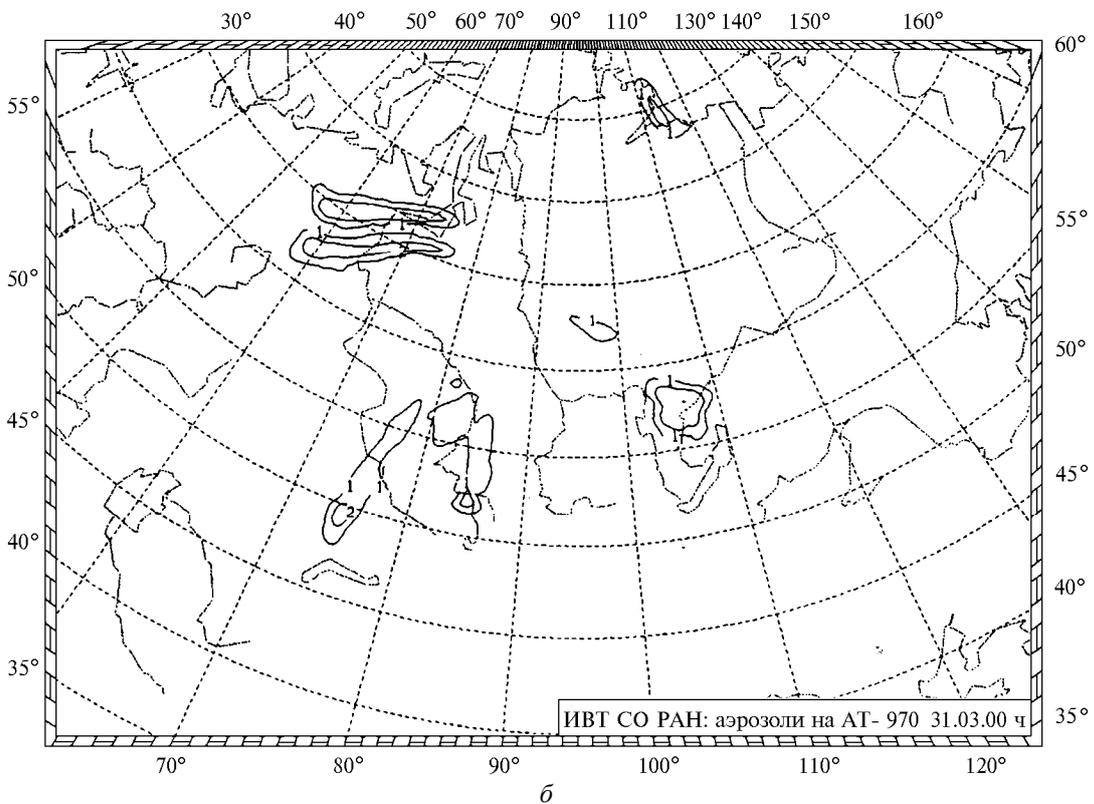
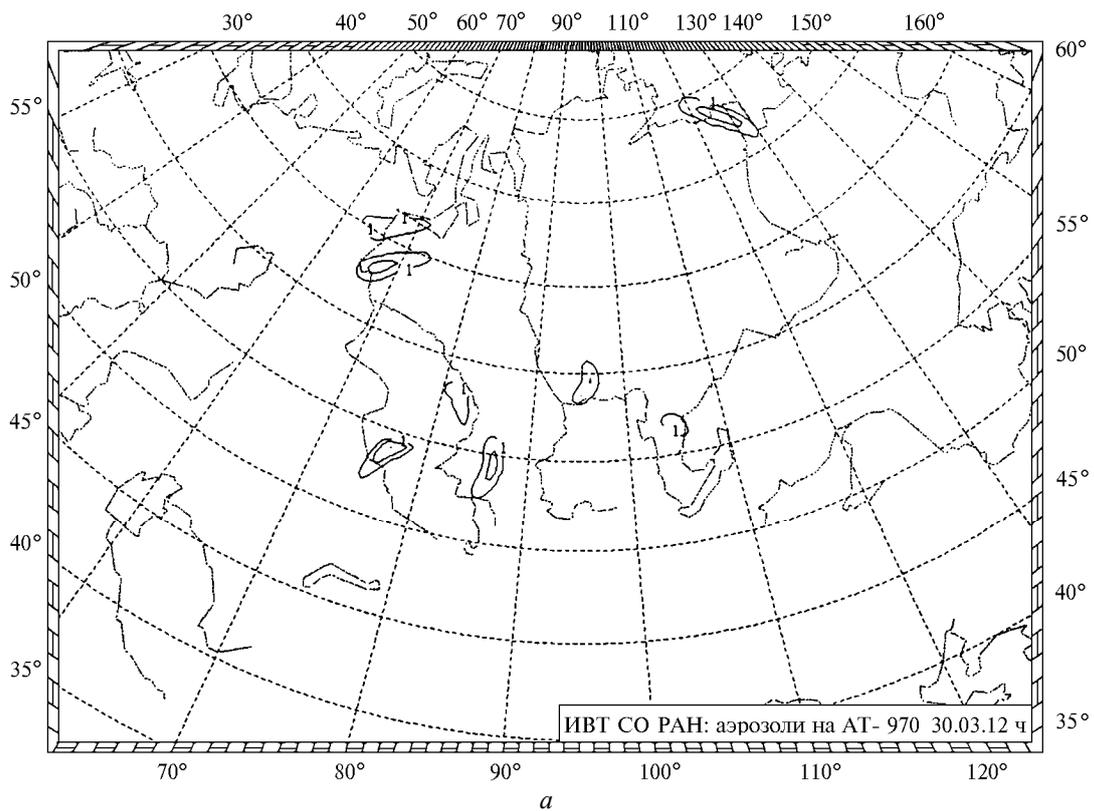


Рис. 3. Поля концентрации аэрозоля на поверхности 970 гПа для моментов времени: *a* – 12 ч; *б* – 24 ч

На боковых границах  $\partial D$  зададим нулевую концентрацию:

$$\varphi_i \Big|_{(x, y, p) \in \partial D} = 0. \quad (5)$$

Для изучения свойств разработанной модели по реальным метеорологическим данным был проведен имитационный эксперимент для 10 пунктов Сибирского региона, в которых в течение ряда лет проводились замеры концентрации различных аэрозолей [1]. В [3] был проведен расчет по моделированию трех одиночных выбросов в атмосфере, а в [4] проводилось ограничение выбросов некоторой величиной, аналогичной ПДК. В данном эксперименте рассматривается непрерывный выброс в атмосферу с усвоением информации о концентрации аэрозоля в указанных выше 10 пунктах на уровне 1000 гПа. Кроме того, добавлены моделирование и перенос на четырех дополнительных уровнях в пограничном слое атмосферы.

Параметризация процессов в пограничном слое атмосферы и значения коэффициента вертикальной диффузии выполнены аналогично [4]. Для решения уравнения (1), как и в [4], используется метод расщепления по физическим процессам [5] на основе схемы Ботта [6].

В модели переноса использована сетка с шагом 30 км по горизонтальным переменным ( $251 \times 211$  узлов сетки) и 19 уровней по вертикали (15 стандартных уровней – 10, 20, 30, 50, 70, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 700, 850, 1000 гПа и 4 дополнительных уровня для описания пограничного слоя атмосферы – 880, 910, 940, 970 гПа). Начальные поля скорости ветра определены аналогично [4]. В данном эксперименте коэффициент  $\beta$  полагался равным 0,01 Па/с. Кроме того, не учитывались локальные преобразования примесей и вымывание их осадками.

На рис. 1 показаны 10 пунктов, в которых проводились замеры концентрации аэрозоля. Для характеристики результатов имитационного эксперимента на рис. 2 и 3 приведены полученные изолинии поля концентраций аэрозоля на поверхности 1000 и 970 гПа по исходным данным о полях ветра за 30–31 марта 1991 г.

Из рис. 2–3 следует, что разработанная модель применима для проведения имитационного моделирования переноса и стока аэрозолей в Сибирском регионе: отсутствуют нежелательные отрицательные значения; перенос аэрозолей происходит различным образом в зависимости от реального распределения полей ветра в различных пунктах Сибирского региона, причем направление переноса в основном по меридиану в Южной Сибири и по параллели в северной части Сибирского региона; заметно различие в высотном распределении полей концентраций, обусловленное учетом конвективного движения и скорости выпадения аэрозолей.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, грант 95–05–15581.

1. Куценогий К.П. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. № 6. С. 704–711.
2. Ривин Г.С. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. № 6. С. 780–785.
3. Ривин Г.С., Куценогий К.П., Климова Е.Г., Воронина П.В., Смирнова А.И. // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. № 6. С. 610–615.
4. Ривин Г.С., Воронина П.В. // Химия в интересах устойчивого развития (в печати).
5. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. М.: Наука, 1989. 608 с.
6. Ривин Г.С., Воронина П.В. // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. № 6. С. 623–633.

Институт вычислительных технологий СО РАН,  
Новосибирск

Поступила в редакцию  
8 января 1998 г.

*G.S. Rivin, P.V. Voronina. Aerosol Transport in Atmosphere: Simulation Experiment.*

A simulation experiment on transfer of atmospheric aerosol is described with real meteorological data for Siberian region based on monotone finite difference scheme and one-parameter model of the atmospheric boundary layer.