

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ИЗУЧЕНИЮ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА ПРИМЕСЕЙ В РАМКАХ ЭЙЛЕРОВА И ЛАГРАНЖЕВА ПОДХОДОВ

Пьянова Э. А., Чернова А. В.

*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО
РАН,*

630090, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева, 6, pianova@ngs.ru.

В работе представлены результаты сравнительных экспериментов по численному моделированию переноса примеси на базе двух трехмерных моделей: детерминированной модели в Эйлеровой постановке и детерминированно-стохастической в рамках Лагранжева подхода.

Решение задач о распространении выбросов, загрязняющих атмосферу, является важной составной частью природоохранной деятельности. Разработка и исследование применимости моделей для решения задачи переноса примесей остаются актуальными и по сей день.

В настоящей работе рассматривается модель переноса пассивной однокомпонентной примеси, которую опишем следующим уравнением [1]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + (w - w_c) \frac{\partial c}{\partial z} = \Delta_c c + f(x, y, z, t) \quad (1)$$

с граничными условиями

$$\frac{\partial c}{\partial x} = 0, \quad x = 0, X, \quad \frac{\partial c}{\partial y} = 0, \quad y = 0, Y, \quad \frac{\partial c}{\partial z} = 0, \quad z = H, \quad (2)$$

$$n_c \frac{\partial c}{\partial z} = (b_c - w_c) c - f_0(x, y, t), \quad z = d(x, y),$$

где c – концентрация примеси, t – время, x, y, z – декартовы координаты, w_c – скорость оседания примеси, β_c – величина, характеризующая взаимодействие примеси с подстилающей поверхностью, f, f_0 – функции источников, $\delta(x, y)$ – функция, описывающая рельеф местности, $\mathbf{u} = (u, v, w)$ – вектор скорости ветра.

Оператор Δ_c имеет вид $\Delta_c = \frac{\partial}{\partial x} \mu_{cx} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu_{cy} \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \nu_c \frac{\partial}{\partial z}$, где $\mu_{cx}, \mu_{cy}, \nu_c$

– коэффициенты турбулентной диффузии в направлении координат x, y, z соответственно.

Для решения поставленной задачи (1)-(2) применялись две трехмерных модели: детерминированная модель в Эйлеровой постановке [1,2] и детерминированно-стохастическая в рамках Лагранжева подхода [3]. Бессеточная структура Лагранжевой модели привязывается к сеточной структуре в Эйлеровых моделях, используемых для формирования гидротермодинамических процессов в несущей среде.

Численная реализация первой модели осуществляется на базе метода расщепления для аппроксимации интегрального тождества, где в качестве весовых функций используются решения локальных сопряженных задач в пределах трехточечных шаблонов по каждому из координатных направлений.

Разностные схемы являются монотонными, транспортными, сохраняют баланс масс.

Алгоритм реализации второй модели строится следующим образом. Производится расщепление по физическим процессам. На этапе переноса по заданному полю скоростей движения воздушных масс, рассчитываются детерминированные элементы траекторий частиц примеси. Турбулентное движение частиц описывается в рамках метода локальных аппроксимаций с помощью суперпозиции локальных нормально распределенных случайных процессов по координатным направлениям, масштаб дисперсии которых рассчитывается через коэффициенты турбулентности.

Входными параметрами для обеих моделей переноса примеси являются поля метеозадающих, рассчитанные по мезомасштабной модели гидротермодинамики атмосферы над сложным рельефом [1, 4].

Для сравнения результатов расчетов на базе используемых моделей был проведен ряд экспериментов по моделированию переноса пассивной примеси над холмистой местностью. Источник выброса загрязнения полагался мгновенным. Координаты источника $x=10\text{ км}$, $y=30\text{ км}$, $z=\delta(x,y)+100\text{ м}$. Во всех сценариях задавались следующие значения входных параметров: размеры области $\{X=42\text{ км}, Y=40\text{ км}, H=2.5\text{ км}\}$, шаги сеточной области $\{\Delta x=\Delta y=2000\text{ м}, \Delta z_k=(100\text{ м при } k=\overline{1,3}; 150\text{ м при } k=\overline{4,5}; 200\text{ м при } k=\overline{6,15})\}$, шаг по времени $\Delta t = 10\text{ с}$, коэффициенты турбулентной диффузии $\mu_{cx}=\mu_{cy}$ вычислялись по модели Смагоринского, вертикальный коэффициент задавался $\nu_c=3\text{ м}^2/\text{с}$. Примесь полагалась невесомой, т. е. $w_c=0\text{ м/с}$.

Для расчетов были выбраны два временных интервала продолжительностью по три часа каждый. В первом эксперименте рассматривалась ситуация соответствующая дневному развитию циркуляций. Второй эксперимент отражает ситуацию распространения примеси в ночные часы.

Дневная циркуляция характеризуется более интенсивными скоростями, чем ночная, и менее однородной структурой поля ветра по вертикали. На рис. 1 представлены горизонтальные разрезы полей концентрации и ветра для дневной ситуации через час после выброса примеси: а) результаты расчетов по модели в лагранжевой постановке, б) в эйлеровой постановке. На рис. 2 даны аналогичные разрезы полей концентрации и ветра для ночного времени через 2 часа 15 минут после выброса примеси. Рис. 3 отражает положение частиц в первом расчетном уровне над поверхностью для тех же моментов времени, что и на рис. 1 и рис. 2. Сравнение показывает, что результаты моделирования распространения примеси по обеим моделям качественно согласуются. Облако загрязнения во всех случаях движется по направлению ветра, хотя модель в эйлеровой постановке сильнее сглаживает поле концентрации примеси.

Таким образом, модели являются пригодными и дополняющими друг друга для прогностических и диагностических целей изучения природных процессов.

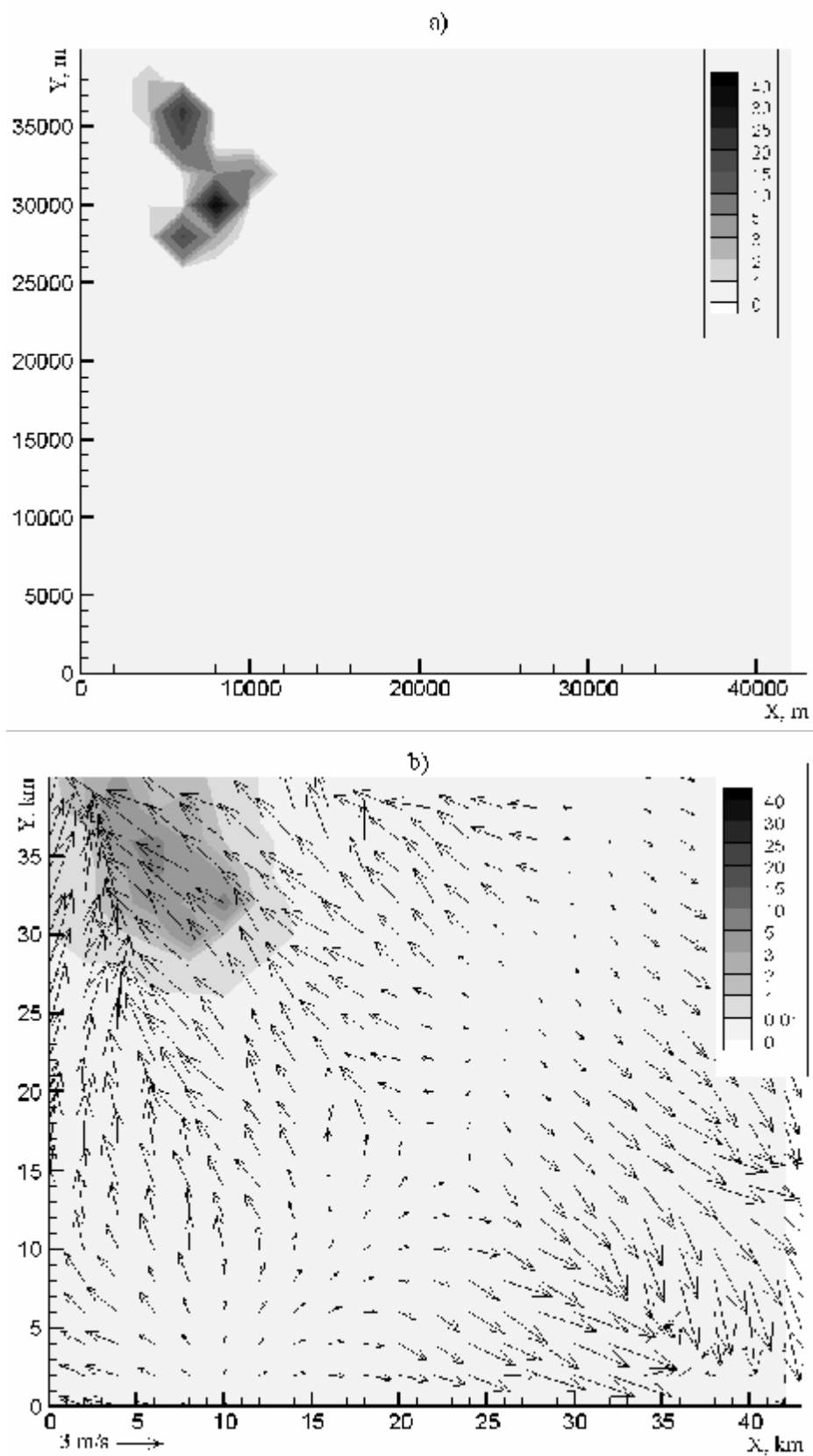


Рис. 1. Концентрация примеси в первом расчетном узле над подстилающей поверхностью через час модельного времени после выброса (дневная циркуляция): а) – результат численного эксперимента по модели в лагранжевой постановке; б) – результат численного эксперимента по модели в эйлеровой постановке.

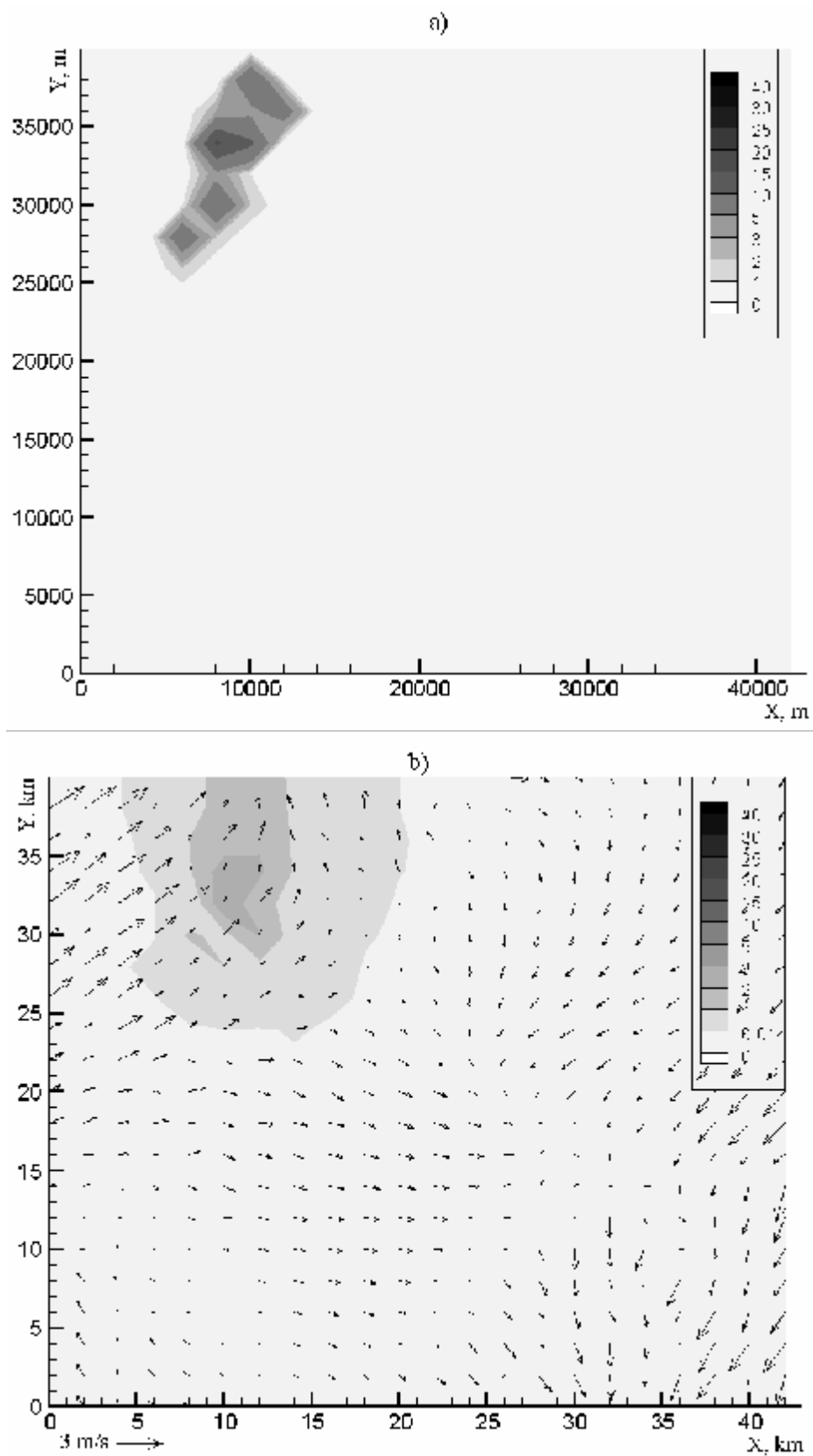


Рис. 2. Концентрация примеси в первом расчетном узле над подстилающей поверхностью через 2 часа 15 минут модельного времени после выброса (вечерняя циркуляция): а) – результат численного эксперимента по модели в лагранжевой постановке; б) – результат численного эксперимента по модели в эйлеровой постановке.

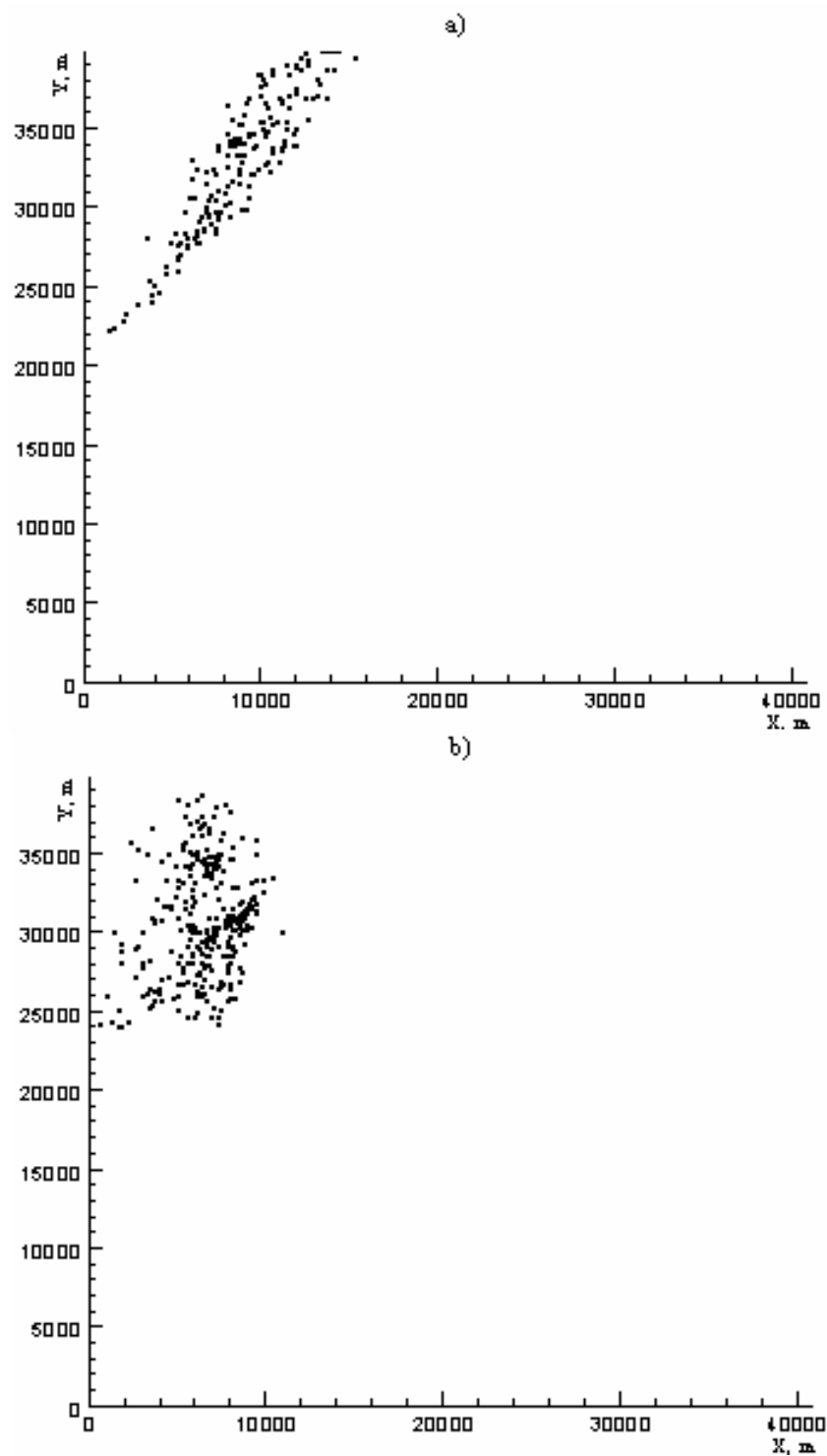


Рис. 3 Концентрация частиц в первом расчетном узле над подстилающей поверхностью в результате численного эксперимента по модели в лагранжевой постановке: а) вечерняя циркуляция; б) дневная циркуляция.

Литература

1. Пененко В. В., Алоян А. Е. Модели и методы для задач охраны окружающей среды. - Новосибирск: Наука, 1985.

2. Пьянова Э. А. Моделирование микроклиматических особенностей межгорных котловин// Серия "Математическое моделирование и современные информационные технологии", вып. 4, Современные проблемы математического моделирования// Сборник трудов XI Всероссийской школы-семинара. Ростов-на-Дону, изд-во Ростовского гос. университета. – 2005. - с. 452 (341-348)

3. Пененко В.В., Цветова Е. А. Моделирование процессов переноса примесей в прямых и обратных задачах климатозоологического мониторинга и прогнозирования // Оптика атмосферы и океана. - 1999. – 12.- № 6. - С. 482-487

4. Пьянова Э. А. Исследование трансформации воздушного потока над термически и орографически неоднородной подстилающей поверхностью// Вычислительные технологии, - 2005. - Том 30. - Ч.2. - С. 106-111.