ДОПОВІДІ
НАЦІОНАЛЬНОЇ
АКАДЕМІЇ НАУК
УКРАЇНИ

4 • 2007

НАУКИ ПРО ЗЕМЛЮ

УДК 551.551.8

© 2007

В. М. Волощук, О. Я. Скриник, Ю. Я. Грицюк

Механізм формування крупномасштабної "плямовидної" структури забруднення підстеляючої поверхні потужним газо-аерозольним викидом у нижній частині атмосфери

(Представлено академіком НАН України В. І. Старостенком)

Basing on the numerical solution of the diffusion problem, we show the consistency of the hypothesis that a possible forming mechanism of a large scale spot-like pollution structure of the underlying surface under intense aerosol injections into the atmospheric boundary layer is a periodic change (diurnal variation) of the turbulent state of the environment.

Розробка, розвиток, удосконалення різних дифузійних моделей є важливою і актуальною науково-практичною задачею. З практичної точки зору, зацікавленість в таких моделях продиктована природоохоронними (збереження чистоти повітря і підстеляючої поверхні), економічними (оцінка ризиків) і навіть політичними потребами. Дифузійні задачі мають і чисто науковий інтерес, адже процес турбулентної дифузії надзвичайно складний. Створені моделі лише з певним наближенням відтворюють процес розсіювання. Існують такі важливі "тонкі" місця процесу турбулентного розсіювання, які або взагалі не враховуються при математичному моделюванні, або враховуються дуже "грубо". Виходячи із зазначеного, можна стверджувати, що нагромадження як експериментальних, так і теоретичних результатів по моделюванню процесу турбулентної дифузії є важливим. Це дасть змогу в майбутньому перейти до створення дифузійних моделей більш високого, в якісному розумінні, рівня.

Одним з зазначених "тонких" моментів турбулентного розсіювання домішок є процес утворення "плямовидної" структури забруднення земної поверхні.

Відомо, що поле забруднення підстеляючої поверхні при великомасштабних атмосферних викидах має чітко виражену "плямовидну" структуру різних масштабів. Підтвердженням цього може бути, наприклад, поле забруднення, яке сформувалося після аварії на четвертому блоці ЧАЕС [1]. Вважається, що основним фізичним механізмом формування великомасштабної "плямовидної" структури є "вологе" вимивання аерозолю конвективними

хмарами і опадами [2, 3]. Але, на наш погляд, з фізичної точки зору існує ще один, достатньо ясний і прозорий фізичний механізм, який здатний формувати великомасштабну "плямовидну" структуру забруднення підстеляючої поверхні. Це — інтенсифікація і затухання конвективної турбулентності у граничному шарі атмосфери (ГША), тобто, періодична зміна (добовий або синоптичний хід) інтенсивності вертикального турбулентного перемішування. Слід відзначити, що вказаний механізм в явному вигляді раніше практично не враховувався в дослідженнях. Якщо залежність інтенсивності розсіювання домішок від типу температурної стратифікації (наприклад, в [4]), або залежність коефіцієнта вертикальної дифузії від часу [3] і враховувалася, то в жодному випадку не зазначено можливість вказаного механізму самостійно формувати великомасштабну "плямовидну" структуру забруднення підстеляючої поверхні.

Доведення правдивості висунутої гіпотези і є основною ціллю даної публікації. Для цього для моделювання дифузійних процесів було використано напівемпіричну K-теорію турбулентної дифузії, і за допомогою числового розв'язку модельної дифузійної задачі показано, що періодична зміна турбулентного стану нижньої частини атмосфери дійсно може самостійно формувати великомасштабну "плямовидну" структуру забруднення підстеляючої поверхні. Зауважимо, що мова йде про розвиток дифузійних процесів на значних просторово-часових масштабах, для яких використання напівемпіричної K-теорії є достатньо обгрунтованим.

Параметризація добового ходу коефіцієнта вертикальної турбулентної дифузії. Відомо, що інтенсивність вертикального турбулентного перемішування в ГША (тобто, величина коефіцієнта вертикальної турбулентної дифузії) залежить від типу температурної стратифікації. Це пов'язано з тим, що при нестійкій стратифікації буде інтенсивно розвиватися так звана конвективна турбулентність, яка буде значно підсилювати динамічну (механічну) турбулентність. Зовсім інша ситуація буде виникати при стійкій стратифікації: будь-який вертикальний рух буде пригнічуватися архімедовими силами плавучості. Тип стратифікації, відповідно — розвиток або згасання конвективної турбулентності, формується, в першу чергу, потужністю вертикальних потоків тепла від земної поверхні, які мають чітко виражений добовий хід. Це добре відомі факти, які детально досліджені і теоретично, і експериментально. Як приклад, відзначимо роботу [5], де досліджено процес руйнування конвективної турбулентності при миттєвій "забороні" теплових потоків від земної поверхні (така ситуація реалізується при заході Сонця). Зауважимо, що в статті [6] на основі опрацювання емпіричних даних, встановлено не тільки добовий хід величини коефіцієнта вертикальної турбулентної дифузії, а й річний. Аналогічні результати отримані також і в публікації [7] (де показано, що відношення інтенсивності турбулентного перемішування в нічний (01 год) і денний (13 год) періоди дорівнює приблизно 0,1).

Таким чином, можна вважати обгрунтованим припущення про періодичну зміну (зокрема, добовий хід) коефіцієнта вертикальної турбулентної дифузії. Для подальшого аналізу використаємо таку параметризацію залежності коефіцієнта вертикальної турбулентної дифузії від часу t. Причому зауважимо, що для зручності розв'язання модельної дифузійної задачі величину t будемо "прив'язувати" до процесу дифузії, тобто t — час дифузії. Отже:

$$\begin{aligned} &K_{zz} = \overline{K_{zz}}(z)\varphi(t), \\ &\varphi(t) = 1 + B\cos\left(\frac{2\pi t}{T} + \omega_0\right), \end{aligned} \tag{1}$$

де K_{zz} — коефіцієнт вертикальної турбулентної дифузії; $\overline{K_{zz}}(z)$ — середнє добове значення коефіцієнта вертикальної турбулентної дифузії на висоті z; функція $\varphi(t)$ описує добовий хід інтенсивності вертикального турбулентного перемішування ($T = 24$ год — повний період, ω_0 — "початкова фаза"); $B \cdot \overline{K_{zz}}(z)$ — амплітуда добового ходу K_{zz} на тій же висоті. В загальному випадку величина B може залежати як від географічних координат, так і від сезону.

Слід особливо наголосити, що параметризація (1) є лише першим наближенням, яке тільки на якісному рівні відтворює реальний добовий хід інтенсивності розсіювання. Зауважимо також, що параметризація (1) описує дещо ідеалізований випадок. Тут не враховано й інші ситуації, які можуть виникати під час еволюції ГША. Наприклад, відомо, що певний вплив на температурну стратифікацію, а отже, і на конвективне перемішування, в ГША має наявність хмарного покриву і його інтенсивність [8]. Можливий випадок, коли щільний хмарний покрив спричинює інтенсивний розвиток конвективного перемішування у верхній частині ГША, особливо у нічний період [9]. Але для поставленої мети дослідження, параметризація (1) є цілком задовільною. Вважаємо, що аналіз і обговорення вигляду функціональної залежності коефіцієнта вертикальної турбулентної дифузії від часу (залежності, яка описує добовий і сезонний хід коефіцієнта вертикальної турбулентної дифузії) предмет окремого дослідження.

Обгрунтування правдивості гіпотези на основі числового розв'язку дифузійної задачі (методом Монте-Карло). Перевірку правдивості висунутої гіпотези будемо проводити на основі розгляду дифузійної задачі, в якій моделюється турбулентне розсіювання газо-аерозольних домішок у нижній частині атмосфери висотою H. Тобто, величина H — вертикальний розмір області дифузії, висота ГША. Джерело забруднень — миттєве, домішки — не осідаючі. Таким чином, математичну постановку задачі опишемо рівняннями

$$\frac{\partial n}{\partial t} + u\frac{\partial n}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}K_{xx}\frac{\partial n}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}K_{yy}\frac{\partial n}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}K_{zz}\frac{\partial n}{\partial z},$$
$$n = n(t, x, y, z),$$
$$t > 0, \qquad |x| < \infty, \qquad |y| < \infty, \qquad 0 < z < H, \tag{2}$$

$$n\big|_{t=0} = Q\delta(x)\delta(y)\delta(z-h), \qquad n\big|_{|x|\to\infty,\,|y|\to\infty} \to 0, \tag{3}$$

$$K_{zz}\frac{\partial n}{\partial z}\bigg|_{z=H} = 0. \tag{4}$$

У рівностях (2)–(4) використано такі позначення: n — концентрація домішок; x, y, z — просторові координати; $\mathbf{V} = \{u, 0, 0\}$ — регулярне перенесення; h й Q — висота й потужність миттєвого джерела; δ — дельта-функція.

Коефіцієнти горизонтальної дифузії вважатимемо сталими. Згідно з результатами робіт [9, 10], реальний вертикальний профіль K_{zz} як в денному, так і в нічному планетарному ГША можна апроксимувати параболічною залежністю від висоти (параметризація Ніїстадта), для регулярного перенесення будемо використовувати логарифмічний профіль в приземному шарі з виходом на стале значення у вищих шарах [11]:

$$u = \frac{u_*}{\chi}\ln\frac{z}{z_0} \qquad \text{при} \qquad z_0 < z < z_1, \tag{5а}$$

$$u \approx u_1 = \text{const} \qquad \text{при} \qquad z_1 \leqslant z, \tag{5б}$$

$$K_{zz} = \overline{K_{zz}}(z)\varphi(t), \qquad \overline{K_{zz}}(z) = cu_* z\left(1 - \frac{z}{H}\right), \tag{6}$$

де u_* — динамічна швидкість (швидкість тертя); χ — стала Кармана; z_0 — параметр шорсткості; z_1 — висота приземного шару; c — безрозмірна константа.

Фізичне обгрунтування можливості використання дифузійного рівняння у вигляді (2) для опису процесів турбулентного розсіювання в нижній частині атмосфери є загальноприйнятим, його можна знайти, наприклад, у [11]. Верхня гранична умова (4) по вертикальній координаті означає повну заборону перенесення домішок у вищі шари, що не є суттєвим обмеженням для дифузійних задач. Така умова приводить до деякого завищення значень турбулентних потоків домішок на підстеляючу поверхню. Нижньою граничною умовою може бути умова часткового або умова повного поглинання. Але тут виникає деяка проблема. Справа в тому, що параболічна параметризація коефіцієнта вертикальної турбулентної дифузії (6) приводить до повної заборони турбулентних потоків при $z = 0$ (також і при $z = H$). З математичної точки зору це означає, що при зазначеній параметризації єдиною коректною нижньої граничною умовою є умова обмеження для n. Тобто, параболічна параметризація коефіцієнта вертикальної турбулентної дифузії з граничною умовою часткового поглинання (чи умовою повного поглинання) несумісна. Розв'язанням зазначеної проблеми є деяке припідняття рівня, на якому формується умова часткового поглинання, як це було зроблено в статті [3]. Таким рівнем може бути висота шорсткості z_0. Таким чином, дифузійну задачу будемо розглядати за таких умов:

$$z_0 < z < H, \qquad K_{zz}\frac{\partial n}{\partial z}\bigg|_{z=z_0} = \beta n\big|_{z=z_0} \qquad \big(\text{або } n\big|_{z=z_0} = 0\big), \tag{7}$$

де β — параметр, який характеризує взаємодію домішок з підстеляючою поверхнею.

Знайшовши розв'язок задачі (2)–(7), очевидно, легко знайти сумарне поле забруднення підстеляючої поверхні $n^*(x, y)$ за формулою:

$$n^*(x, y) = \int_0^\infty K_{zz}\frac{\partial n}{\partial z}\bigg|_{z=z_0} dt.$$

Отримати аналітичні розв'язки задачі (2)–(7) практично неможливо, тому виникає необхідність в числовій реалізації задачі. Оскільки моделюються дифузійні процеси на дуже великих просторово-часових масштабах, то на нашу думку, досить ефективним і раціональним способом числового розв'язання (2)–(7) є метод Монте-Карло, який із задовільною точністю дає змогу оцінити сумарне забруднення підстеляючої поверхні газо-аерозольною хмарою.

Для реалізації методу Монте-Карло здійснимо деякі перетворення в рівнянні (2):

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}un + \frac{\partial}{\partial z}\frac{\partial K_{zz}}{\partial z}n = \frac{\partial^2}{\partial x^2}K_{xx}n + \frac{\partial^2}{\partial y^2}K_{yy}n + \frac{\partial^2}{\partial z^2}K_{zz}n. \tag{8}$$

Рівняння (8) можна розглядати як рівняння Фоккера–Планка–Колмогорова для унарної безумовної щільності розподілу ймовірностей марковського випадкового процесу $\mathbf{R}(t) =$

$= \{R_x(t); R_y(t); R_z(t)\}$, заданого системою стохастичних диференціальних рівнянь:

$$\left.\begin{aligned} \frac{dR_x}{dt} &= u + \sqrt{2K_{xx}}w_x(t), \\ \frac{dR_y}{dt} &= \sqrt{2K_{yy}}w_y(t), \\ \frac{dR_z}{dt} &= \frac{\partial K_{zz}}{\partial z} + \sqrt{2K_{zz}}w_z(t), \end{aligned}\right\} \tag{9}$$

де $\mathbf{w}(t)$ — дельта-корельований гауссовий випадковий процес із статистично незалежними компонентами. Тобто, рівняння (8) і система (9) — еквівалентні. В подальшому необхідно отримати різницевий аналог системи (9). Для цього проінтегруємо систему стохастичних диференціальних рівнянь (9) з межами від t до $t+\Delta t$, де Δt — проміж часу, протягом якого величину K_{zz} можна вважати сталою (незалежною від часу). Отримаємо

$$\left.\begin{aligned} R_x(t+\Delta t) &= R_x(t) + u\Delta t + \sqrt{2K_{xx}\Delta t}G_x, \\ R_y(t+\Delta t) &= R_y(t) + \sqrt{2K_{yy}\Delta t}G_y, \\ R_z(t+\Delta t) &= R_z(t) + \frac{\partial K_{zz}}{\partial z}\Delta t + \sqrt{2K_{zz}\Delta t}G_z, \end{aligned}\right\} \tag{10}$$

де G_x, G_y, G_z — статистично незалежні нормально розподілені випадкові величини, середні значення яких дорівнюють 0, а дисперсії — 1. Зауважимо також, що система (9) (або (10)) описує координати деякої "блукаючої" частинки. Останню систему легко реалізувати на комп'ютері. Крім того, легко змоделювати граничні умови (4) і (7).

Зауважимо, що метод незалежних статистичних випробовувань (метод Монте-Карло) можна використовувати для опису дифузійних процесів і без початкового розгляду дифузійного рівняння (див., наприклад, [12]). Для цього потрібно лише ввести в розгляд відповідну схему випадкових "блукань" аерозольних частинок, аналогічну (10). Обгрунтування такої схеми для випадку дифузії у нижній частині атмосфери, де є істотно просторова (особливо — вертикальна) неоднорідність інтенсивності турбулентного розсіювання, не є тривіальним. В нашому випадку, оскільки рівняння в частинних похідних (2) і система стохастичних диференціальних рівнянь (9) є еквівалентними, то схема випадкових блукань (10) є достовірною в тій мірі, в якій справедливе використання напівемпіричної К-теорії (тобто, рівняння (2)) для описання дифузійних процесів в нижній частині атмосфери.

Результати обчислень, які відображають сумарне забруднення підстеляючої поверхні при деяких конкретних значеннях вхідних параметрів моделі представлені на рис. 1. Очевидно, чітко прослідковується "плямовидна" структура забруднення місцевості.

Результати проведеного математичного моделювання приводять до висновку, що висунута гіпотеза про можливість формування великомасштабної "плямовидної" структури забруднення підстеляючої поверхні механізмом добового ходу інтенсивності турбулентного перемішування дійсно має чітке підтвердження. Можна вважати, що цей важливий механізм, по суті, відповідальний за формування "фонової" великомасштабної "плямовидної" структури забруднення, а інші механізми просто вносять свій відповідний вклад в ці процеси.

У цьому повідомленні розглянуто тільки миттєво діюче джерело забруднень, тобто дифузія "хмари". При дифузії факела цей механізм, на нашу думку, теж буде спрацьовувати, особливо, коли інтенсивність викидів з джерела і напрям регулярного перенесення є ісотно

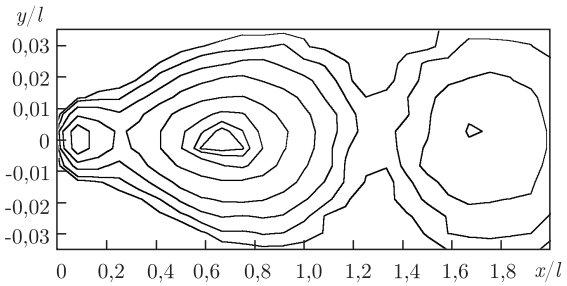

Рис. 1. Поле забруднення підстеляючої поверхні сформоване потужним газо-аерозольним викидом, розраховане методом Монте-Карло за системою рівнянь (10) (нижня гранична умова — умова повного поглинання). Суцільні лінії — ізолінії безрозмірної сумарної поверхневої концентрації. Координати джерела: $(0, 0, H/2)$; "початкова фаза" коефіцієнта вертикальної турбулентної дифузії: $\omega_0 = \pi/2$; $l = u_1 T$

нестаціонарними. Саме така ситуація і реалізовувалася при забрудненні місцевості після аварії на ЧАЕС.

1. *Чернобыль:* радиоактивное загрязнение природных сред / Под ред. Ю. А. Израэля. – Ленинград: Гидрометеоиздат, 1990. – 235 с.
2. *Седунов Ю. С., Борзилов В. А., Клепикова Н. В. и др.* Физико-математическое моделирование регионального переноса в атмосфере радиоактивных веществ в результате аварии на Чернобыльской АЭС // Метеорология и гидрология. – 1989. – № 9. – С. 5–10.
3. *Волощук В. М.* Аналитические решения диффузионной задачи для атмосферной примеси // Метеорология и гидрология. – 1991. – № 11. – С. 5–15.
4. *Борзилов В. А., Ветлищева Н. С., Клепикова Н. В. и др.* Региональная модель переноса полидисперсной примеси в атмосфере // Метеорология и гидрология. – 1988. – № 4. – С. 57–65.
5. *Nieuwstadt F. T. M., Brost R. A.* The decay of convective turbulence // J. Atmospheric Sci. – 1986. – **43**, 6. – P. 532–546.
6. *Fujitani T.* Seasonal variation of the structure of the atmospheric boundary layer over a Suburban area // Atmospheric Environment. – 1986. – 20(10). – P. 1867–1876.
7. *Маренко А. Н., Семенова А. П., Козленко Т. В.* О характеристике условий рассеяния примесей по данным о турбулентном обмене на территории Украины // Тр. УкрНИГМИ. – 1991. – Вып. 241. – С. 24–33.
8. *Stull R. B.* An introduction to boudary layer meteorology. – Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1988. – 666 p.
9. *Sorbjan Z.* Large-Eddy simulation of air pollution dispersion in the nocturnal cloud-topped atmospheric boundary layer // Boudary-Layer Meteorology. – 1999. – **91**, 1. – P. 145–157.
10. *Атмосферная* турбулентность и моделирование распространения примесей / Под ред. Ф. Т. М. Ньистадта и Х. Ван Допа. – Ленинград: Гидрометеоиздат, 1985.
11. *Монин А. С., Яглом А. М.* Статистическая гидромеханика. Теория турбулентности. Т. 1. – Санкт-Петербург: Гидрометеоиздат, 1992. – 696 с.
12. *Галкин Л. М.* Решение диффузионных задач методом Монте-Карло. – Москва: Наука, 1976. – 96 с.

Український науково-дослідний гідрометеорологічний інститут НАН України та МНС України, Київ

Надійшло до редакції 02.10.2006