

О.Я. Скриник

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ КРУПНОМАСШТАБНОГО ПЛЯМИСТОГО ЗАБРУДНЕННЯ МІСЦЕВОСТІ ТОЧКОВИМ МИТТЄВИМ ДЖЕРЕЛОМ

На основі чисельного розв'язку модельної дифузійної задачі досліджено особливості процесу формування крупномасштабного плямистого забруднення підстильної поверхні потужним миттєвим викидом забруднювальних речовин.

Ключові слова: атмосферна дифузія, граничний шар атмосфери, забруднення місцевості, плямистість.

Вступ

Публікація є продовженням серії робіт [1-4], присвячених дослідженню процесу формування крупномасштабної плямистої структури забруднення підстильної поверхні за рахунок періодичної зміни (добового чи синоптичного ходу) інтенсивності вертикального турбулентного перемішування в граничному шарі атмосфери (ГША). Нагадаємо, що під плямистістю розуміємо наявність *декількох* (> 1) локальних максимумів сумарного забруднення підстильної поверхні (поверхневої концентрації домішок).

Миттєве джерело забруднюючих домішок уже розглядалось у публікаціях [1, 2]. Але розглядався тільки частковий випадок, оскільки їх метою було лише обґрунтування гіпотези про *можливість* формування плямистості за рахунок вказаного механізму. Детальне дослідження особливостей процесу формування забруднення за наявності миттєвого джерела не проводилося. Крім того, у представленому дослідженні, на відміну від [1, 2], використовуються складніші (і реальніші) параметризації вертикальних профілів коефіцієнтів дифузійного рівняння, що робить результати і висновки дослідження більш обґрунтованими.

Отже, **мета** представленої публікації – дослідити закономірності формування крупномасштабної плямистої структури забруднення підстильної поверхні за рахунок вищезазначеного механізму за наявності потужного миттєвого джерела.

Модельна дифузійна задача

Розглядаємо атмосферну дифузію домішок, точкове миттєве джерело яких знаходиться в межах нижньої частини атмосфери (тобто, нижче висоти денного ГША, або в деякому околі цієї висоти). Будемо розглядати як періодичну зміну турбулентної структури ГША лише його добовий хід. Зауважимо, що добовий хід турбулентної структури ГША в помірних широтах північної півкулі найбільш чітко проявляється в теплий період року при певному стаціонуванні синоптичної ситуації. Тому в представленому дослідженні обмежимо себе вказаними умовами. Процес формування плямистості в разі зміни синоптичної ситуації має свої особливості і є складнішим для аналізу. Особливо, коли часовий проміжок моделювання дифузійних процесів співпадає з часом різкої зміни синоптичної ситуації. Тому такі випадки потребують окремого дослідження.

Часовий проміжок, на якому розглядаються дифузійні процеси, рівний декільком добам. За такий час забруднюючі речовини стають добре перемішаними в межах ГША. Це означає, що для моделювання дифузійних процесів може бути використана напівемпірична К-теорія.

Отже, математична постановка двохвимірної модельної дифузійної задачі в наближенні К-теорії є наступною:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = K_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial z} K_z \frac{\partial c}{\partial z}, \quad (1)$$

$$c = c(t, x, z), \quad t > 0, \quad |x| < \infty, \quad z_0 < z < \infty,$$

$$K_x = const, \quad (2)$$

$$c|_{t=0} = Q \delta(x) \delta(z - h_*), \quad Q = const, \quad z_0 < h_* < \infty \quad (3)$$

$$c|_{|x| \rightarrow \infty} \rightarrow 0, \quad (4)$$

$$c|_{z=z_0} = 0, \quad z_0 \neq 0 \quad (5)$$

$$c|_{z \rightarrow \infty} \rightarrow 0. \quad (6)$$

де c – концентрація домішок; t, x, z – час та просторові прямокутні Декартові координати; u – швидкість регулярного перенесення, напрям якого збігається з віссю Ox ; K_x і K_z – коефіцієнти повздовжньої та вертикальної турбулентної дифузії; Q і h_* – потужність та висота (або ефективна висота для нагрітих чи плавучих домішок) джерела; $\delta(x)$ – дельта функція Дірака, z_0 – параметр (висота) шорсткості.

Параметризація ГША

Для замикання модельної дифузійної задачі (1)-(6) необхідно задати коефіцієнти дифузійного рівняння u та K_z . Тобто, необхідно параметризувати їх залежність від вертикальної координати та часу.

Параметризація вертикальних профілів K_z та u . Для коефіцієнта вертикальної турбулентної дифузії в межах ГША використовувалась параметризація, запропонована в [5]. У цій параметризації залежність K_z від стійкості ГША здійснюється опосередковано через лінійний масштаб Моніна-Обухова L .

Якщо $L < 0$, тоді:

$$K_z = K_{zm} + K_{zc}, \quad K_{zm} = 0.3 z u_* (1 - z/h), \quad K_{zc} = \frac{0.24 z (z/h)^{1/3}}{q_{wc}^{4/3}} w_*,$$
$$w_* = u_* \left(-\frac{h}{\kappa L} \right)^{1/3}, \quad q_{wc} = \begin{cases} 0.48, & z \leq 0.1h \\ 1.6 z/h (1 - e^{-4z/h} - 3 \cdot 10^{-4} e^{8z/h})^{-1}, & 0.1h \leq z \leq h \end{cases} \quad (7)$$

де K_{zm} – механічна частина, а K_{zc} – конвективна частина коефіцієнта вертикальної турбулентної дифузії; h – висота граничного шару, w_* – конвективний масштаб швидкості; u_* – динамічна швидкість (швидкість тертя); κ – стала Кармана; q_{wc} – функція стійкості.

Якщо $L > 0$, то

$$K_z = \frac{0.3 z u_* (1 - z/h)}{1 + 3.7 z/\Lambda}, \quad \Lambda = L (1 - z/h)^{(1.5\alpha_1 - \alpha_2)}, \quad (8)$$

де α_1 і α_2 – емпіричні константи ($\alpha_1 = 2$, $\alpha_2 = 3$, дані експерименту в Мінесоті).

Параметризація (7)-(8) належить до класу параболічних профілів K_z , які відтворюють реальний вертикальний профіль коефіцієнта вертикальної дифузії в денному та нічному ГША [6].

Вище граничного шару коефіцієнт вертикальної турбулентної дифузії вважався сталим:

$$K_z = const, \quad \text{при } z > h.$$

Параметризація вертикального профілю швидкості вітру в приземному шарі атмосфери проводилась відповідно до теорії подібності Моніна-Обухова [7]:

$$u = \frac{u_*}{k} [\ln(z/z_0) - \psi_m(z/L) + \psi_m(z_0/L)], \quad (9)$$

де $\psi_m(z/L)$ – функція стійкості, яка задає поправку логарифмічного профілю за умови, що стратифікація є відмінною від нейтральної ($\psi_m = 0$ за нейтральної стратифікації). Функція ψ_m параметризувалася, використовуючи наступні співвідношення [8]:

$$\psi_m = \begin{cases} 2 \ln\left(\frac{1 + \phi_m^{-1}}{2}\right) + \ln\left(\frac{1 + \phi_m^{-2}}{2}\right) - 2 \tan^{-1}(\phi_m^{-1}) + \frac{\pi}{2}, & L < 0 \\ -4.7 z/L, & L > 0 \end{cases}$$

$$\phi_m = \begin{cases} (1 - 16 z/L)^{-1/4}, & L < 0 \\ 1 + 4.7 z/L, & L > 0 \end{cases}$$

де ϕ_m – безрозмірний профіль вітру.

Вище приземного шару швидкість вітру вважалася сталою, тобто:

$$u(z) = u(z_b), \text{ якщо } z > z_b,$$

де z_b – висота приземного шару ($z_b \approx 5 \div 10\%$ висоти ГША).

Параметризації (7)-(8) та (9) дають неперервний перехід для значень K_z та u для всіх типів стійкості ГША (від нестійкої до стійкої). Це дозволяє використовувати їх для моделювання атмосферної дифузії у повному добовому циклі. Як правило, нестійка стратифікація переважає у світлий час доби (після сходу сонця), а стійка – у нічний час (після заходу сонця) [9].

Параметризація добового ходу основних параметрів турбулентного стану ГША

Вертикальні профілі u та K_z залежать від параметрів L , h та u_* . Всі три параметри змінюють свої значення в ході добового циклу. Для моделювання дифузійних процесів протягом часового інтервалу у декілька днів необхідно задати їх добовий хід. На жаль, простих параметризаційних формул, які б описували часову динаміку основних параметрів турбулентного стану ГША не вдалося знайти в спеціалізованій літературі.

Як перше наближення, залежність лінійного масштабу Моніна-Обухова від часу будемо задавати в наступному вигляді:

$$L^{-1} = B_L \cos\left(\frac{2\pi t}{T} + \omega_0\right), \quad (10)$$

де B_L – амплітуда добового ходу L^{-1} (може також залежати і від географічних координат, і від періоду року), $T = 86400 \text{ c}$ – повний період ($86400 \text{ c} = 1 \text{ доба}$), ω_0 – початкова фаза ($0 \leq \omega_0 < 2\pi$), t – час дифузії (час, відрахований від початку дифузії). Аналогічні залежності будемо використовувати також і для параметрів h і u_* :

$$h = \bar{h} - B_h \cos\left(\frac{2\pi t}{T} + \omega_0\right), \quad (11)$$

$$u_* = \bar{u}_* - B_{u_*} \cos\left(\frac{2\pi t}{T} + \omega_0\right), \quad (12)$$

де B_h і B_{u_*} – амплітуди добового ходу висоти ГША та динамічної швидкості, \bar{h} і \bar{u}_* – їх середні добові значення.

Слід ще раз наголосити, що параметризації (10), (11) та (12) – це лише перші наближення, які тільки на якісному рівні відтворюють реальний добовий хід параметрів турбулентного стану ГША. Все ж, незважаючи на це, їх можна використовувати для поставлених цілей (моделювання дифузійних процесів).

Запропоновані параметризації добового ходу задають плавний (монотонний) перехід від стійкої стратифікації до нестійкої, і навпаки. У реальній атмосфері зазначені переходи відбуваються більш різкіше. Наприклад, руйнування денного конвективного ГША після заходу Сонця (з подальшим формуванням нічного граничного шару значно меншої висоти), згідно з теоретичними дослідженнями [10] та експериментальними вимірюваннями [9], відбувається дуже швидко, протягом 1-2 годин. Відповідно, більш різкіше буде відбуватися зміна інтенсивності вертикального перемішування. Це означає, що використовуючи параметризації часового ходу у вигляді гармонічних коливань, ми „послаблюємо” механізм формування плямистості.

Використання реальних часових профілів буде стимулювати появу плямистості більш чіткіше. Реальний часовий хід інтенсивності вертикального турбулентного перемішування буде більше схожий до ступінчастої функції, яка з часом може „переключатися” між двома можливими станами. Тобто, у світлий час доби – перемішування „увімкнуте”, а в темний – „вимкнуте”.

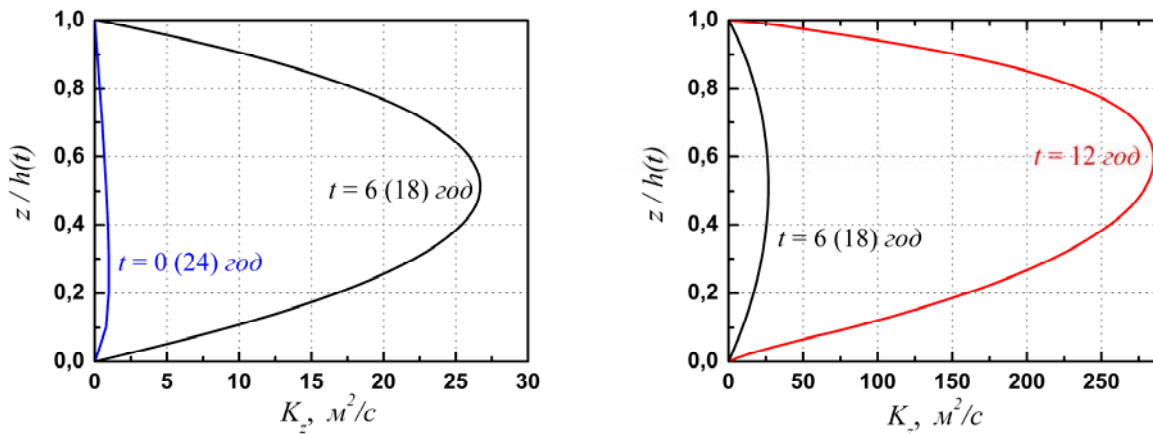


Рис. 1. Додова еволюція вертикального профілю K_z при використанні параметризацій (10), (11), (12) ($\omega_0 = 0$). Вертикальна координата нормована на висоту ГША

На рис. 1 представлено вертикальні профілі K_z , розраховані за формулами (7)-(8), за значень L , h та u_* , що визначаються на основі (10)-(12) у певні моменти часу доби. Для розрахунку профілів K_z , а також і для чисельного розв'язування модельної дифузійної задачі використано наступні значення параметрів у формулах (10)-(12): $B_L = 0.01 \text{ м}^{-1}$, $\bar{h} = 1000 \text{ м}$, $B_h = 800 \text{ м}$, $\bar{u}_* = 0.35 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, $B_{u_*} = 0.05 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Згідно з [11] використане значення амплітуди B_L означає, що стійкість ГША змінюється від класу стійкості С до класу Е за відомою класифікацією Паскуїла-Гіфорда (Pasquill-Gifford) [6]. Максимальні значення висоти ГША та динамічної швидкості рівні 1800 м та $0,4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, мінімальні – 200 м та $0,3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ відповідно. Такі значення не сильно відрізняються від реальних значень при зазначених вище умовах.

Схема чисельного розв'язку дифузійної задачі

У зв'язку зі складністю задачі вона розв'язувалась чисельно. Чисельна схема розв'язування базувалася на скінченно-різницевому методі.

Обмеження та дискретизацію простору проведено наступним чином:

$$x \in [0; L_x]: x_i = ih_x, h_x = L_x/N_x, i = 0, \dots, N_x,$$

$$z \in [z_0; L_z]: z_i = z_0 + ih_z, h_z = (L_z - z_0)/N_z, i = 0, \dots, N_z,$$

$$t \in [0; T_0]: t^m = m\tau, \tau = T_0/N_t, m = 0, \dots, N_t,$$

де $L_x = 600$ км; $L_z = 2$ км; $T_0 = 48$ год; $N_x = 2000$ ($h_x = 300$ м); $N_z = 200$ ($h_z = 10$ м); $N_t = 288$ ($\tau = 600$ с).

Використовуючи метод послідовних по-координатних розщеплень [12], було отримано одновимірні дифузійні задачі:

$$\frac{\partial c_x}{\partial t} + u \frac{\partial c_x}{\partial x} = K_x \frac{\partial^2 c_x}{\partial x^2},$$

$$c_x \Big|_{|x| \rightarrow \infty} \rightarrow 0;$$

$$\frac{\partial c_z}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} K_z \frac{\partial c_z}{\partial z},$$

$$c_z \Big|_{z=z_0} = 0, \quad c_z \Big|_{z \rightarrow \infty} \rightarrow 0.$$

Для їх розв'язання використовувалася чисельна схема Кранка-Ніколсона [13].

Результати розрахунків

Основна невідома величина, значення якої розраховувались на основі чисельного розв'язку дифузійної задачі – накопичене (сумарне) забруднення підстильної поверхні, тобто поверхнева концентрація забруднювальних домішок. Значення цієї величини розраховано за формулою:

$$c^*(x) = \int_0^{\infty} K_z \frac{\partial c}{\partial z} \Big|_{z=z_0} dt. \quad (11)$$

На рис. 2 представлено профілі сумарного забруднення місцевості за різних значень висоти джерела (h_*) та початкового моменту дифузії (ω_0).

Результати проведених розрахунків та аналіз графіків дозволяють зробити наступні узагальнення:

1. Плямистість спостерігається при \forall (фізичних) h_* та ω_0 .
2. При зменшенні h_* ($\omega_0 = const$) зростає перший локальний максимум і зменшується його відстань до джерела. Інші локальні максимуми зменшуються, але їх розташування практично не міняється. Фізичне пояснення цього факту полягає в тому, що чим нижче джерело, тим швидше домішки досягають земної поверхні і тим інтенсивніше буде відбуватися забруднення. І чим більший перший локальний максимум

(чим більше домішок осіло в точці першого максимального забруднення), тим менше домішок залишається в атмосфері. Відповідно, у наступних максимумах їх поглинання буде меншим.

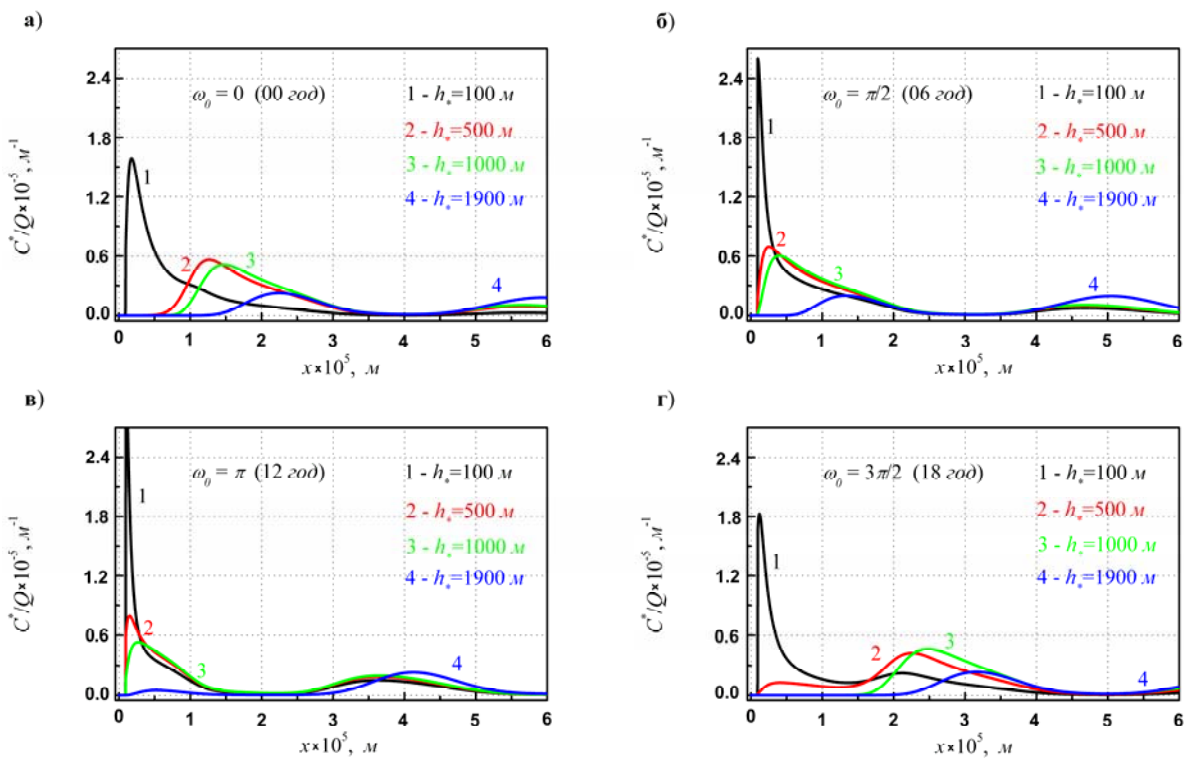


Рис. 2. Горизонтальні профілі c^* за різних значень параметрів h_* та ω_0

3. Під час зміни ω_0 ($h_* = const$) від 0 радіан (00 год) до 2π радіан (24 год) відбувається перерозподіл точок локальних максимумів: їх відстані до джерела зменшуються. Але для значень $\omega_0 > \pi$ (12 год) повинно існувати деяке критичне значення висоти джерела $h_{*кр}$, таке, що за умови $h_* > h_{*кр}$ перший локальний максимум не буде формуватися. Тобто, вертикальна дифузія за час, що залишився до настання темного періоду доби, „не встигає” перемістити домішки до земної поверхні в кількості, достатній для формування зони підвищеної концентрації (рис. 2г).

Висновки

У роботі на основі чисельного моделювання проведено дослідження особливостей формування плямистості забруднення підстильної поверхні, спричиненого миттєвим джерелом.

В основному досліджено залежність горизонтального розподілу поверхневої концентрації домішок від висоти джерела та початкового

моменту дифузії. Отримані узагальнення є також важливими для подальших досліджень формування плямистості, спричиненої неперервним чи фінітним джерелом. У цьому разі, розбиваючи неперервне джерело на певну кількість миттєвих викидів, можна простіше проаналізувати фізичні процеси формування забруднення місцевості.

Важливим результатом роботи є також додаткове обґрунтування справедливості гіпотези про формування плямистості за рахунок періодичної зміни турбулентної структури ГША. Представлені результати є справедливими в межах обґрунтованості використаних параметризацій.

* *

1. Волощук В.М., Скриник О.Я., Грицюк Ю.Я. Механізм формування крупномасштабної "плямовидної" структури забруднення підстилаючої поверхні потужним газо-аерозольним викидом в нижній частині атмосфери // Доповіді НАНУ. – 2007. – № 4. – С. 115-120.
2. Скриник О.Я., Грицюк Ю.Я. Механізм формування крупномасштабної "плямовидної" структури забруднення місцевості потужним газо-аерозольним викидом в граничному шарі атмосфери // Геофізичний журнал. – 2007. – Т. 29, № 4. – С. 191-198.
3. Скриник О.Я. Дослідження формування плямистості забруднення місцевості потужним висотним фінітним джерелом на основі простих аналітичних моделей атмосферної дифузії // Геофізичний журнал. – 2010. – Т.32, № 3, – С. 86-92.
4. Skrynyk O. Y., Chernysh R. I., Hrytsyuk Y. Y. Formation of a large scale spot-like structure of the total deposition due to a powerful elevated finite source // Advances in Science and Research. – 2010. – V.4. – 37-41.
5. Mangia, C., Moreira, D.M., Schipa, I., Degrazia, G.A. a.o. Evaluation of a new eddy diffusivity parameterisation from turbulent Eulerian spectra in different stability conditions, Atmos. Environ., 36, 67-76, 2002.
6. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей / Под ред. Ф. Т. М. Ньистадта и Х. Ван Дона. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 348 с.
7. Monin, A.S. and Yaglom, A.M. Statistical fluid mechanics, MIT Press, Cambridge, 1971.
8. Businger, J.A., Wyngaard, J.C., Izumi, Y. and Bradley, E.F. Flux-profile relationship in the atmospheric surface layer, J. Atmos. Sci., 28, 181-189, 1971.

9. *Stull, R.B.* An introduction to boundary layer meteorology, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 666 pp, 1988.
10. *Nieuwstadt F.T.M., Brost R.A.* The Decay of Convective Turbulence // Journal of the Atmospheric Sciences. – 1986. – 43, № 6. – P. 532-546.
11. *Irwin, J.S.* A theoretical variation of the wind profile power-law exponent as a function of surface roughness and stability, Atmos. Environ., 13, 191-194, 1979.
12. *Марчук Г.И.* Методы расщепления – М.: Наука, 1988. – 262 с.
13. *Hoffman, J.D.* Numerical methods for engineers and scientists. Basel, New York, 2001.

*Український науково-дослідний
гідрометеорологічний інститут, Київ*

О.Я. Скриник

Особенности формирования крупномасштабного пятнистого загрязнения местности точечным мгновенным источником

На основе численного решения модельной диффузионной задачи исследованы особенности процесса формирования крупномасштабной пятнистой структуры загрязнения подстилающей поверхности мощным мгновенным источником.

Ключевые слова: атмосферная диффузия, пограничный слой атмосферы, загрязнение местности, пятнистость.

О.У. Skrynyk

Peculiarities of large-scale contamination spottiness formation due to an instantaneous point source

Using numerical solution of the model diffusion problem we have studied peculiarities of large-scale contamination spottiness formation due to an instantaneous point source.

Keywords: atmospheric diffusion, planetary boundary layer, contamination, spottiness.