Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

М. В. Меньшов, Математическое моделирование динамики распространения и осаждения полидисперсного аэрозольного образования в условиях пересеченного рельефа местности, *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2007, выпуск 2(), 176–178

DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu553>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 54.80.97.219

26 апреля 2023 г., 02:20:48

2. Постон, Т. Теория катастроф и её приложения [Текст] / Т. Постон, И. Стюарт; пер. с англ. — М.: Мир, 1980. — 608 с.
3. Хорн, Р. Матричный анализ [Текст] / Р. Хорн, Ч. Джонсон; пер. с англ. — М.: Мир, 1989. — 355 с.
4. Барбашин, Е. А. Введение в теорию устойчивости [Текст] / Е. А. Барбашин. — М.: Наука, 1967. — 233 с.

Институт машиноведения Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург
evgen_pros@mail.ru

Поступила 07.03.2007

УДК 001.891.57

М. В. Меньшов

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ОСАЖДЕНИЯ ПОЛИДИСПЕРСНОГО АЭРОЗОЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕСЕЧЕННОГО РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ

Проанализированы результаты математического моделирования переноса аэрозольного образования в условиях пересеченного рельефа местности с использованием верифицированной математической модели. Получены результаты, позволяющие проводить предварительную качественную оценку результатов распространения примесей в приземном слое атмосферы и осадения их на подстилающей поверхности пересеченной местности.

В последние годы все более распространенным способом проведения авиационных работ в сельском хозяйстве становится способ ультрамалообъемного внесения рецептур с резко сниженными весовыми нормами, но обладающих несравнимо большей химической активностью, по сравнению с используемыми ранее веществами. Такого рода работы проводятся в условиях слабо- и среднeperесеченной местности, в предположении сохранения динамики осадения аэрозольных образований, характерной для соответствующих процессов над равнинной местностью. Имеющиеся на практике негативные результаты (дальние выносы аэрозольного облака; наличие зон концентраций, превышающих допустимую, и пр.) списываются, как правило, на случайные порывы ветра или другие форсмажорные обстоятельства.

В данной работе анализируются результаты математического эксперимента, проведенного с помощью модели, подробно описанной в работе [1], где были представлены результаты её верификации в условиях блокирующей инверсии в пограничном слое атмосферы (ПСА).

Модель реализуется в несколько этапов. Сначала, исходя из результатов предварительных измерений необходимых метеопараметров, решается задача на установление динамического потока в условиях заданного рельефа местности [2, 3]. Расчёты базируются на решении уравнений гидротермодинамики с учётом автомоделных зависимостей Мони́на—Обухова [4] и теории подобия в слое постоянных потоков. Турбулентное замыкание проведено на основе двумерной модели Смагоринского [5].

Полученные при этом характеристики, такие как компоненты скорости ветра, значение коэффициента турбулентности, а также высота устойчивого приземного слоя, используются затем при реализации блока переноса примеси, в основе которого лежит уравнение полуэмпирической теории переноса и турбулентной диффузии для концентрации $C(x, y, z, t)$:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_s)C}{\partial z} = \alpha_c \frac{\partial}{\partial x} K_x \frac{\partial C}{\partial x} + \alpha_c \frac{\partial}{\partial y} K_y \frac{\partial C}{\partial y} + \alpha_c \frac{\partial}{\partial z} K_z \frac{\partial C}{\partial z} + R_c, \quad (1)$$

где u, v, w — компоненты вектора скорости; w_s — скорость гравитационного оседания примеси; K_x, K_y, K_z — коэффициенты турбулентного обмена в направлениях x, y, z соответственно; $\alpha_c = 1/Sm$; Sm — число Шмидта; R_c — интенсивность эмиссии вещества ($\text{гм}^{-3}\text{с}^{-1}$).

Базовый набор краевых условий для уравнения (1) формулируется в следующем виде:

на боковых границах области —

$$\frac{\partial C}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial C}{\partial y} = 0;$$

на подстилающей поверхности —

$$K_z \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \quad \text{при} \quad z = \delta + z_u,$$

где z_u — параметр шероховатости поверхности;
на верхней границе —

$$K_z \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \quad \text{при} \quad z = h.$$

Для получения плоской модели переноса и диффузии примеси, согласованной с базовыми динамическими уравнениями, проводится вертикальное осреднение (1) в предположении, что в каждой точке протяжённого линейного источника структура концентрации близка к гауссовому факелу [6]. При этом для $C(z)$ задаётся следующее выражение:

$$C(z) = N_c \left[\exp \left(-\frac{(z - h_c)^2}{2\sigma_z^2} \right) + \exp \left(-\frac{(z + h_c)^2}{2\sigma_z^2} \right) \right],$$

где h_c — высота источника эмиссии над землёй; σ_z — стандартное отклонение (дисперсия); N_c — нормировочная константа.

С целью проведения вертикального осреднения уравнение (1) записано в дивергентной форме. При интегрировании по z используется условие обращения в нуль вертикального потока массы на верхней границе. В итоге получается искомое уравнение переноса средней по вертикали концентрации вида

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial huC}{\partial x} + \frac{\partial hvC}{\partial y} = \alpha_c \left(\frac{\partial}{\partial x} hK \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} hK \frac{\partial C}{\partial y} \right) + R_c - w_g c.$$

Таким образом, в результате работы модели выдаётся поле наземных концентраций, наложенное на изолинии рельефа, сгенерированного с помощью специальной программы до начала основных расчётов. Это позволяет, меняя интересующие параметры решаемой задачи, анализировать характер распределения концентраций в контрольных точках расчётной области.

Условия проведённого математического эксперимента. Вводилась декартова система координат (x, y, z) , в которой ось z направлена вверх, ось x — на восток, а ось y — на север. Область решения определяется в виде параллелепипеда

$$0 \leq x \leq L_x, \quad 0 \leq y \leq L_y, \quad \delta \leq z \leq h \quad (2)$$

с неровной нижней границей, отражающей неоднородность рельефа подстилающей поверхности, где L_x, L_y — размеры области по горизонтали; функция $z = \delta(x, y)$ задаёт рельеф местности; h — положение верхней границы рассматриваемой области.

Расчётная область (5000×5000 м) подразумевала наличие одиночного холма-1 с основанием 1600×5000 м, высотой 47,5 м и протяжённостью наветренного склона — 800 м. На высоте 30 м помещался нормальный к ветру линейный источник аэрозоля. Его удаление от наветренного склона, а также структура гранулометрического состава аэрозоля подбирались таким образом, чтобы выполнялось следующее условие: зона, шириной в расчётную область и протяжённостью 1000 м от подножия, описанного выше холма-1 полностью покрывается «значимыми» (ввиду модельного характера эксперимента диапазон «значимых» концентраций выбирался произвольно) наземными концентрациями, при этом сам наветренный склон не обнаруживает выпадений такого рода.

На первом этапе эксперимента указанное поле концентраций было получено для двух расчётных скоростей ветра: 7 и 10 м/с. Заложенная изначально в эксперимент скорость сносящего потока 5 м/с при исходных параметрах рельефа и фиксированном положении источника эмиссии полное покрытие нужной площади не давала ни при какой функции гранулометрического состава аэрозоля, однако не была исключена из эксперимента, что впоследствии дало весьма интересные результаты. Результаты расчётов приведены в таблице.

После достижения начальной картины распределения наземных концентраций в указанной выше области, в ней генерировался одиночный холм-2, высота которого в различных повторях составляла 10, 15 и 20 м. Исследовалась степень вынуждающего влияния этого холма на динамику распространения и осаждения аэрозолей, указанных составов при указанных скоростях ветра. В этом случае получены следующие результаты. При скорости ветра 5 м/с, с ростом высоты холма-2, зона «значимых» концентраций увеличилась по сравнению с начальным, равнинным, вариантом на 32 %, при этом покрыв практически полностью запланированную на первом этапе площадь.

Зависимость гранулометрического состава аэрозоля и удаления его источника от скорости ветра в приземном слое атмосферы

Скорость ветра в приземном слое, м/с	Удаление источника аэрозоля от подножия холма-1, м	Структура аэрозольного образования, диаметр капель — %
5	1050	70 мкм — 20 %, 100 мкм — 50 % 120 мкм — 30 %
7	1100	100 мкм — 30 %, 160 мкм — 40 % 180 мкм — 30 %
10	1170	170 мкм — 20 %, 190 мкм — 20 % 220 мкм — 60 %

Увеличение высоты «препятствия» при скорости ветра 7 м/с также продлило зону эффективного осаждения аэрозоля, дав уже при высоте холма-2 в 10 м недопустимое, по условиям поставленной задачи, покрытие наветренного склона холма-1 (порядка 12 %, считая от его подножия). При высоте же холма-2 в 20 м зона «значимых» концентраций увеличилась на этом склоне ещё на 23 %.

Обратный эффект наблюдался при скорости ветра 10 м/с. С ростом высоты холма-2 зона учитываемых концентраций удалялась от подножия холма-1. Увеличение скорости сносящего потока и выбранный для достижения начальной картины выпадений «тяжёлый» гранулометрический состав аэрозольного образования способствовали, как показали расчёты, более скорому оседанию частиц аэрозоля на поверхность холма-2, сглаживая его влияние на вынос капель в верхние слои и дальнейший их снос в глубь обрабатываемой зоны. Следует отметить, что не смотря на то, что в рамках проведённого математического эксперимента не ставилась задача анализа равномерности оседания рабочего вещества на контрольной площади, расчёт при скорости ветра 10 м/с выявил наличие зон переконцентраций (зоны, в которых значения наземных концентраций оказались значительно выше соответствующих концентраций в условно выбранном диапазоне) на расчётных площадях примерно от середины наветренного склона-2 до его вершины.

Выводы. Приведённые выше результаты показывают, что наличие даже пологих, невысоких, холмов вносит существенные изменения в характер распространения и осаждения аэрозольного образования в условиях пересеченного рельефа местности. Разработка рекомендаций на этапе предварительного планирования и подготовки авиационных мероприятий в сельском хозяйстве должна производиться при самом тщательном анализе имеющихся особенностей, учитывающих топографию, дисперсность рабочего вещества и условия проведения авиационных работ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Меньшов, М.В. О математической модели миграции и осаждения полидисперсного аэрозольного образования [Текст] / М.В. Меньшов // Вестн. Сам. госуд. ун-та. Естественная серия. — 2006. — № 6/1(46). — С. 114–112.
2. Шлычков, В.А. Численная модель пограничного слоя атмосферы с детализацией конвективных процессов на основе вихреразрешающего подхода [Текст] / В.А. Шлычков / В кн.: Аэрозоли Сибири. — Новосибирск: Изд-во СО РАН. — 2005. — С. 43–48.
3. Леженин, А.А. Численная модель миграции аэрозоля, образовавшихся в зоне лесных пожаров [Текст] / А.А. Леженин, В.А. Мальбахов, В.А. Шлычков // Оптика атмосферы и океана. — 2003. — Т. 16, № 5–6. — С. 485–488.
4. Монин, А.С. Статистическая гидромеханика [Текст] / А.С. Монин, А.М. Яглом. — СПб: Гидрометеиздат, 1992. — 694 с.
5. Smagorinsky, J. Numerical results from a ninelevel general circulation model of the atmosphere [Text] / J. Smagorinsky, S. Manabe, J. Hollway // Month. Weather Rev. — 1965. — Vol. 93, No. 8. — P. 727–768.
6. Бызова, Н.Л. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчёты рассеяния примеси [Текст] / Н.Л. Бызова, В.Н. Иванова, Е.К. Гаргер. — СПб: Гидрометеиздат, 1991. — С. 8–23.

Самарская государственная сельскохозяйственная академия, п. Усть-Кинельский
menshov_m@mail.ru

Поступила 29.05.2007