

В.М. Мальбахов*, В.А. Шлычков**

О влиянии мезомасштабных вихрей на вертикальный перенос примесей в атмосфере

*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск
 **Новосибирский филиал Института водных и экологических проблем СО РАН

Поступила в редакцию 9.02.2000 г.

Предложена полуэмпирическая модель мезомасштабного атмосферного вихря с вертикальной осью вращения. Приводятся оценки массы жидких или твердых частиц, попавших в вихрь с водной или с покрытой песком поверхности суши.

Введение

В атмосфере часто возникают мезомасштабные вихри, у которых ось вращения близка к вертикальной. Эти вихри называются по-разному, в зависимости от их размеров и интенсивности: пылевой вихрь, смерч, тромб, торнадо. Диаметр наименьшего из пылевых вихрей – несколько метров, диаметр наиболее мощного торнадо около 1 км. Характерная особенность этих вихрей – наличие мощных вращательных движений и вертикальных токов, от 1 до 20 м/с у пыльных вихрей и от 20 до 100 м/с в смерчах и торнадо.

Наличие интенсивных движений у подстилающей поверхности способствует процессам сальтации над покрытой песком или запыленной поверхностью и процессам влагообмена жидкой фракцией между атмосферой и водоемами. Интенсивные восходящие токи приводят к вертикальному переносу жидких и твердых частиц примеси, в том числе и очень крупных, на большие высоты. Вертикальные размеры мезомасштабных вихрей, как правило, гораздо больше их горизонтальных размеров.

Попадая на большие высоты, частицы примеси переносятся на большие расстояния и влияют на различные процессы даже в достаточно удаленных районах. Так, частицы соли, образовавшиеся из испарившихся морских капель, а также песчинки и пылинки служат ядрами конденсации пара и коагуляции дождевых капель.

При прохождении смерчей и торнадо над промышленными и химическими предприятиями, атомными электростанциями в атмосферу попадают твердые, жидкие и газообразные токсичные вещества, представляющие угрозу для здоровья людей на больших территориях. Тем не менее процессы массообмена между подстилающей поверхностью и атмосферой при мезомасштабных вихрях малоисследованы. Данная статья – попытка частично восполнить этот пробел. В ней предложенная в [1, 5] упрощенная модель мезомасштабного вихря с вертикальной осью используется для теоретического исследования массообмена между атмосферой и водоемом или покрытой песком подстилающей поверхностью.

Постановка задачи и получение решения

Обзор работ по развитию теории мезомасштабных вихрей с вертикальной осью дан в [2, 3]. В [4] предложена численная модель, с помощью которой показано, что мезомасштабные атмосферные вихри являются конвективными ячейками с существенно измененной пространственно-временной структурой. Такие изменения происходят под влиянием закручивания воздуха вокруг оси ячейки из-за наличия в атмосфере вращательного момента. Эта численная модель достаточно сложна и не позволяет однозначно трактовать полученные с ее помощью результаты, поэтому в [5] предложены две упрощенные аналитические модели: линейная – для пояснения временных изменений структуры вихря, и нелинейная – для объяснения его пространственной структуры.

Путем сравнения упрощенной нелинейной модели с численной моделью [1, 5] было показано, что упрощенная модель достаточно точно воспроизводит структуру мезомасштабного вихря на стадии его максимального развития. Исходная система уравнений упрощенной модели получена из уравнений Буссинеска в пренебрежении нестационарностью, вязкостью и силами Архимеда и имеет следующий вид [1, 5]:

Путем сравнения упрощенной нелинейной модели с численной моделью [1, 5] было показано, что упрощенная модель достаточно точно воспроизводит структуру мезомасштабного вихря на стадии его максимального развития. Исходная система уравнений упрощенной модели получена из уравнений Буссинеска в пренебрежении нестационарностью, вязкостью и силами Архимеда и имеет следующий вид [1, 5]:

$$u \frac{\partial w}{\partial r} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -R \theta_0 \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{p'}{p} \right); \quad (1)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial r} + w \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{uv}{r} = 0; \quad (2)$$

$$\frac{v^2}{r} = R \theta \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{p'}{p} \right); \quad (3)$$

$$\frac{\partial ur}{\partial r} + \frac{\partial wr}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

где u , w – радиальный и вертикальный компоненты скорости в цилиндрических координатах r , z ; v – вращательный компонент скорости; p' – отклонение давления от его значения p в невозмущенной атмосфере; R – универсальная газовая постоянная; θ – средняя температура конвективного слоя.

Решение системы (1)–(4) получено в [1, 5] и имеет следующий вид:

$$w = (1 - (r/r_0)^2) \exp(- (r/r_0)^2) F; \\ v = \sqrt{2} (r/r_0) \exp[- (r/r_0)^2] F; \quad (5)$$

$$u = - (r/2) \exp [- (r/r_0)^2] \frac{\partial F}{\partial z};$$

$$p' = - \frac{P}{2 R \theta_0} \exp [- 2(r/r_0)^2] F^2. \quad (6)$$

Далее считаем, что произвольная функция $F(z) > 0$. В этом случае воздух движется вверх в ядре смерча: $w > 0$ при $r < r_0$ и вниз на ее периферии: $w < 0$ при $r > r_0$. Обратим внимание на то, что именно ядро вихря должно быть видимым образованием смерча из-за непрозрачных частиц и предметов, поднятых с поверхности мощными токами. Вертикальный компонент максимален на оси вихря $w = w_{\max} = F(z)$ при $r = 0$. Средние значения вертикального компонента в ядре вихря имеют следующие значения:

$$\bar{w} = \frac{2 \pi}{\pi r_0^2} \int_0^{r_0} w r dr dz = F e^{-1}. \quad (7)$$

Нетрудно рассчитать, что на одинаковых высотах максимальное значение скорости восходящих токов гораздо больше максимальной скорости нисходящих движений. Тем не менее, нисходящие движения являются компенсационными, поскольку $2\pi(\pi r_0^2) \int_0^{r_0} w r dr dz = 0$. Вращательный компонент скорости достигает максимального значения в ядре вихря: $v = v_{\max} = \exp(-0,5)F$ при $r = r_0/\sqrt{2}$. На периферии вихря v быстро затухает с ростом r . Вертикальную структуру смерча определяет функция F . В силу непроникновения частиц воздуха сквозь подстилающую поверхность $F = 0$ при $z = 0$. Далее F растет ($dF/dz > 0$) до высот порядка нескольких метров. В этой области воздух движется к оси смерча.

Согласно наблюдениям на участке протяженностью 1 км и более видимая часть смерча от высоты зависит слабо. Мы будем считать, что в этой области $F \approx \text{const}$, $u \approx 0$. На больших высотах вблизи облака, породившего смерч, он начинает ослабевать ($dF/dz < 0$). В этой части вихря $u > 0$ и частицы воздуха, двигаясь от центра, попадают на периферию смерча в область нисходящих движений. Достигая приземной части вихря, частицы воздуха вновь попадают в ядро смерча. Таким образом, в данной модели частицы воздуха не выходят за пределы замкнутого локального объема, который в среднем не превышает нескольких кубических километров. Действительно, наблюдения показывают, что воздух может находиться в относительном покое в сравнительной близости от смерча.

Теория и приближенные оценки для реального торнадо [3] показывают, что вертикальный и вращательный компоненты скорости близки друг к другу. Аналитическая модель дает результаты, весьма близкие к тому, что наблюдается в реальной действительности на стадии относительной стабильности вихря, длительность которой, по видимому, не превышает 1 ч.

Влияние вихрей на вертикальный перенос примесей

Дополним (1)–(4) следующим упрощенным уравнением для переноса примеси:

$$u \frac{\partial s}{\partial r} + (w - w_0) \frac{\partial s}{\partial z} = 0, \quad (8)$$

где s – объемная концентрация примеси; w_0 – собственная скорость оседания частиц.

Решение (7) имеет следующий вид:

$$s = ar(v - \psi) \text{ при } v \geq \psi, s = 0 \text{ при } v < \psi, \quad (9)$$

где v находится из (5); $\psi = \sqrt{2}rw_0/r_0$; $a = \text{const}$, определяемая из условий для s на нижней границе.

Зададим эти условия. Рассмотрим сценарий, когда примесь представляет собой мелкие капельки, которые поступают в воздух с поверхности воды при сильном волнении, вызванном прохождением вихря. В случае, если вихрь имеет место над морями или океанами, то в атмосферу попадает растворенная в воде соль. Этот аэрозоль играет важную роль в процессах осадкообразования. Следуя [1], считаем, что для брызг соленой воды при $z = z_0$

$$\lg s = -94,6V^2/(V^3 + 172) + 6, \quad (10)$$

где V – модуль скорости ветра у поверхности воды; s – удельное содержание жидких капель (водность), г/м^3 .

Обратимся теперь к эмпирическим данным. Согласно [1] основной характеристикой опасности смерча является класс его интенсивности K . При этом средняя скорость вращательного движения v_k , средняя скорость вращательного движения у Земли v_0 , ширина вихря L_k и его высота H_k определяются из следующих соотношений:

$$v_k = 6,3(K + 2,5)^{1,5} \text{ м/с}, \quad (11)$$

$$v_0 = 1,6(K + 2,5)^{1,5} \text{ м/с}; \quad (12)$$

$$L_k = 1,609 \cdot 10^{0,5(K+1,5)} \text{ м}; \quad (13)$$

$$H_k = 6,6 \cdot 10^{0,5(K+1,5)} \text{ м}, 0 \leq K \leq 5. \quad (14)$$

Попытаемся теперь объединить эмпирические соотношения (11)–(14) с теоретическим решением (5)–(9). Очевидно, что

$$r_0 = \frac{L_k}{2}, v_k = \bar{v} = \frac{2 \pi}{\pi r_0^2} \int_0^{r_0} v r dr dz \approx 0,79 v_{\max},$$

$$v_0 = \approx 0,79 v_{\max}^0; \quad (15)$$

при $z = z_0$

$$\lg s_0 = -94,6 v_0^2 / (v_0^3 + 172) + 6 \quad (16)$$

$$\text{и } v_{\max}^0 = v_{\max}, s_0 = \frac{2 \pi}{\pi r_0^2} \int_0^{r_0} s r dr \approx 0,61 a r_0 v_0. \quad (17)$$

Таким образом, найдена связь между водностью и интенсивностью вихря у подстилающей поверхности. Учитывая, что в вихрях $v \gg \psi$, и пренебрегая в (9) малым слагаемым, для общего количества раствора M_p , содержащегося в ядре вихря, имеем следующее приближенное соотношение:

$$M_p = \pi r_0^2 H_k s_0. \quad (18)$$

При получении (18) предполагалось, что под влиянием мощных восходящих токов примесь со средней концентрацией s_0 достаточно быстро заполнит ядро вихря. На периферии вихря под влиянием более слабых компенсационных нисходящих токов и силы тяжести примесь медленно оседает на подстилающую поверхность. Заметим, что объем периферийной части вихря превосходит объем его ядра, а вертикальные скорости на периферии значительно меньше. Поэтому периферия вихря (при достаточном времени его существования) может содержать массу примеси, превышающую ее содержание в ядре. К сожалению, в эмпирической модели отсутствуют значения для вертикального компонента скорости. Связь между интенсивностью вертикальных и вращательных составляющих скорости в ядре вихря дает теоретическая модель:

$$\bar{w} = \epsilon^{0.5} / 0,79 \bar{v} = 0,95 v_k. \quad (19)$$

Теперь рассмотрим случай, когда источником поступления примеси является покрытая пылью или песком подстилающая поверхность. При этом не будем разделять процессы диффузии и сальтации, считая, что при $w \gg w_0$ все частицы, имеющие вертикальный импульс, подхватываются вихревым потоком и далее переносятся в виде взвеси. Приземная концентрация определялась путем решения задачи о движении частиц с совместным расчетом динамических характеристик приповерхностного слоя. Объем статьи не позволяет привести все используемые уравнения – они приведены в [6], где, кроме того, даны постановка задачи и детальный анализ решения.

Основные параметры смерча в зависимости от класса интенсивности даны в таблице. Там же приведены расчетные значения вынесенного в ядро смерча раствора, вычисленного с помощью (18), и M_n – массы вынесенного в ядро смерча песка со средним диаметром, равным 125 мкм.

Параметры смерча и масса примеси в ядре вихря

K	0	1	2	3	4	5
\bar{v} , м/с	25	38	56	82	104	128
\bar{w} , м/с	24	36	54	78	99	122
v_0 , м/с	6,1	9,1	14	20,5	26	32
L , м	9	29	90	290	900	2900
H , м	35	110	350	1100	3500	11000
M_p , т	$2 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-5}$	2	660	$2 \cdot 10^5$	$6,7 \cdot 10^7$
M_n , т	0,1	4,3	181	8282	$3,1 \cdot 10^5$	$1,3 \cdot 10^7$

V.M. Malbakhov, V.A. Shlychkov. On the effect of mesoscale vortices on the vertical transport of substances in the atmosphere.

A semi-empirical model of mesoscale atmospheric vortex with a vertical axis of rotation is proposed. Estimates of the masses of liquid or solid particles getting into the vortex from a water surface or from a sand-covered land surface are given.

Заключение

Из таблицы видим, что слабые вихри нулевого и первого классов интенсивности водяных капель вверх практически не поднимают, потому что при малых скоростях не происходит обрушение волн. Однако мощные вихри четвертого и особенно пятого классов интенсивности поднимают вверх огромное количество раствора. Так, согласно таблице, наиболее интенсивный вихрь может поднять объем воды, содержащийся в небольшом озере, что действительно подтверждается наблюдениями.

Особая опасность возникает при прохождении таких вихрей над бассейнами-охладителями атомных электростанций [1] и над отстойниками промышленных и химических предприятий. Очевидно, что при прохождении интенсивных вихрей над морями и океанами вверх выносятся большое количество соли, которая после испарения морских капель может долгое время оставаться в атмосфере в виде мелкодисперсного аэрозоля. Однако для оценки этого механизма поставки соляных частиц в атмосферу необходимы статистические данные о мезомасштабных вихрях над морями и океанами. Насколько известно, такие данные отсутствуют. По-видимому, какая-то информация может быть получена при обработке спутниковых фотографий.

Что касается выноса пылевых частиц и песка мезомасштабными вихрями, то, согласно таблице, он происходит уже при относительно слабых вихрях. Действительно, в пустынях, полупустынях и сухих степях часто так называемые пыльные вихри малой и средней интенсивности, видимые за много километров из-за частиц примеси, в них содержащихся. Однако интенсивные вихри масштаба торнадо всегда сопровождаются интенсивной циклонической деятельностью, когда имеют место ливни, грозы, град, обильно орошающие землю. В этих условиях вынос мелких частиц с подстилающей поверхности затруднен и не описывается такой моделью.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, гранты № 99-05-64678, 99-05-64735.

1. Мальбахов В.М., Дробышев А.Д., Брюхань А.Ф., Погребняк В.Н. // Анализ и прогноз метеорологических элементов и речного стока. Вопросы охраны атмосферы. Пермь: Изд-во ПГУ, 1995. С. 55–68.
2. Trapp R., Fiedler B. // J. Atm. Sci. 1995. V. 52. N 21. P. 3757–3778.
3. Интенсивные атмосферные вихри / Под ред. Л. Бенсона и Дж. Лайтхила. М.: Мир, 1985. 368 с.
4. Мальбахов В.М. // Изв. РАН. Сер. ФАО. 1972. Т. 8. N 1. С. 17–28.
5. Мальбахов В.М. Гидродинамическое моделирование эволюции атмосферных конвективных ансамблей. Новосибирск: Изд-во ВЦ СО РАН, 1997. 166 с.
6. Бютнер Э.К. Динамика приповерхностного слоя воздуха. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 157 с.