

## ДИНАМИКА ПЫЛИ В ПЫЛЕВЫХ ВИХРЯХ

Ю.Н. Извекова, С.И. Попель

### DYNAMICS OF DUST IN DUST DEVILS

Yu.N. Izvekova, S.I. Popel

Моделируется динамика пылевых частиц в пылевых вихрях (Dust Devils), которые часто возникают в условиях земной атмосферы. Рассматриваемые пылевые вихри – это хорошо сформированные и относительно долгоживущие структуры, возникающие при хорошей (солнечной) погоде, их размеры варьируются от полуметра в ширину и нескольких метров в высоту до более чем ста метров в ширину и более километра в высоту. Вихревая структура такова, что пониженное давление в центре способствует поднятию мелких пылевых частиц с поверхности. Взаимодействуя друг с другом, пылевые частицы заряжаются и создают электрические поля, достигающие  $10^4$  В/м. В данной работе рассматривается движение пылевых частиц, обсуждаются условия отрыва от поверхности и эффекты зарядки.

Dust particle dynamics is modeled in the so-called Dust Devils (DDs), which are a widespread event in the Earth's atmosphere. DD is a well-formed, and relatively long-lived whirlwind, emerging in sunny weather, ranging from small (half a meter wide and a few meters tall) to large (more than 100 meters wide and more than 1000 meters tall) in Earth's atmosphere. The whirling structure with low pressure in the core picks up small dust particles from the surface. Interacting with each other dust particles become electrically charged and produce electric fields greater than  $10^4$  V/m. In this work we study dust particles motion, discuss the conditions of isolation from the surface and the effects of charging.

#### Введение

Пылевые вихри (Dust Devils, DD), широко распространенное явление в атмосферах Земли и Марса, представляют собой сильное хорошо сформированное и относительно долгоживущее вихревое образование, размеры которого изменяются в диапазоне от малых (полуметра шириной и нескольких метров высотой) до больших (более ста метров в ширину и километра в высоту) в условиях земной атмосферы. Марсианские пылевые вихри могут быть более чем в пятьдесят раз шире и более чем в десять раз выше земных. Даже небольшие пылевые вихри производят радишумы и электрические поля, достигающие  $10^4$  В/м и выше. Пылевые вихри захватывают небольшие пылевые частицы. Вращаясь в вихревой структуре, пылевые частицы сталкиваются и трутся друг о друга и приобретают электрический заряд. При этом мелкие частицы заряжаются отрицательно, а крупные положительно [Lacks, 2007]. В восходящем потоке это приводит к пространственному разделению зарядов и возникновению электрического диполя. Кроме того, вращающиеся частицы создают магнитное поле. Электрические поля способствуют подъему вещества в атмосферу с поверхности. Неустойчивость, характеризующая генерацию пылевых вихрей, описывается уравнениями аналогичными уравнениям, описывающим внутренние гравитационные волны [Onishchenko, 2014]. Математически динамика пылевых вихрей близка к динамике тороидальной плазмы, соответственно, методы развитые в исследованиях управляемого термоядерного синтеза могут быть применимы при моделировании пылевых вихрей. Сильные локальные вихри более эффективно поднимают пыль с поверхности, чем горизонтальные ветра, поэтому полагают [Ferri, 2003], что DD являются основным механизмом подъема пыли на Марсе. В данной работе изучается динамика пылевых частиц в пылевых вихрях.

#### Модель

Пылевые вихри (DD) обычно наблюдаются над засушливыми областями с хорошей инсоляцией.

Нагрев поверхности солнечным излучением приводит к неустойчивой стратификации, т. е. к появлению слоев воздуха, в которых температура уменьшается с высотой. В работе [Onishchenko, 2014] показано, что пылевые вихри образуются в результате конвективной неустойчивости внутренних гравитационных волн. При этом сначала появляется вихревое движение в вертикальной плоскости, на которое вскоре накладывается тороидальная завихренность, соответствующая горизонтальным скоростям. Динамика нелинейной вихревой структуры описывается следующими уравнениями [Onishchenko, 2014]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \tilde{\Delta}\psi + \frac{d \ln \rho_0}{dz} \frac{d\psi}{dz} \right) + \frac{1}{r} J \{ \psi, \tilde{\Delta}\psi \} =$$

$$= -r \frac{d\chi}{dr} + \frac{r}{\rho_0^2} J \{ \tilde{\rho}, \tilde{p} \},$$

$$r \frac{\partial \chi}{\partial t} - \omega_g^2 \frac{\partial \psi}{\partial r} + J \{ \psi, \chi \} = 0,$$

$$\frac{\partial \omega_z}{\partial t} + u_r \frac{\partial \omega_z}{\partial r} = \omega_z \frac{\partial u_z}{\partial z},$$

где

$\tilde{\Delta} = r \frac{\partial}{\partial r} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$  – оператор Грэда-Шафранова,  $\psi$  –

функция тока полоидального движения,  $\omega_g$  – частота Вайсяля-Брента,  $g$  – ускорение свободного падения,  $J\{A, B\}$  – якобиан. Плотность и давление представлены в виде суммы невозмущенного значения и малого возмущения  $\rho = \rho_0 + \tilde{\rho}$ ,  $p = p_0 + \tilde{p}$ , возмущения плотности и давления малы  $|\tilde{\rho}| \ll \rho_0$ ,  $|\tilde{p}| \ll p_0$ ;  $\chi = g \tilde{\rho} / \rho_0$  – нормированное возмущение плотности,  $\omega_z$  – тороидальная завихренность. Полоидальные компоненты скорости  $u_r$  и  $u_z$  определяются функцией тока

$$u_r = -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad u_z = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r}.$$

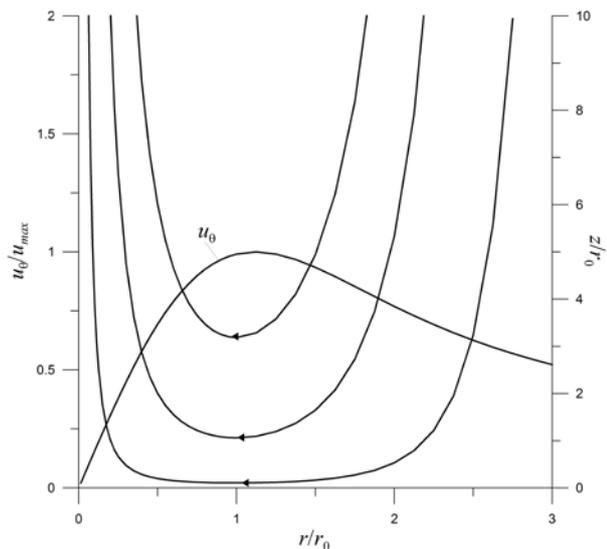


Рис. 1. Полоидальные линии тока и зависимость тороидальной скорости  $u_\theta$  от расстояния от оси симметрии вихря.

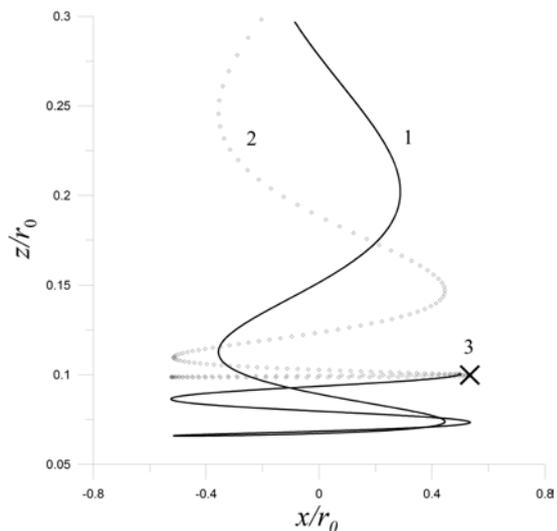


Рис. 2. Пример траектории пылевой частицы с диаметром 50 мкм в типичном пылевом вихре в земной атмосфере. 1 – траектория частицы без учета электрического поля, 2 – траектория частицы с учетом поля  $E=2.5$  кВ/м, заряд частицы  $5 \cdot 10^{-14}$  Кл. 3 – точка старта для расчета траектории частицы.

Уравнения (1) и (2) описывают полоидальное движения, а уравнение (3) характеризует тороидальное движение. На рис. 1. показаны полоидальные линии тока и зависимость тороидальной скорости  $u_\theta$  от расстояния от оси симметрии вихря.

### Динамика пыли

В данной работе была рассчитана динамика пылевых частиц в модельном пылевом вихре с учетом действия сил разной природы. На рис. 2 представлены примеры траекторий пылевой частицы диаметром 50 мкм в вихре радиусом ядра  $r_0=10$  м и максимальной скоростью  $u_{\max}=30$  м/с.

### Выводы

Построена модель для описания поведения пылевых частиц в пылевом вихре. На основе модели проведены расчеты и показано, что пылевые вихри являются важным механизмом подъема пыли в атмосферах Земли и Марса.

Работа выполнена при поддержке Президентского гранта (проект № МК-6935.2015.2) и РФФИ (проект № 14-05-31410 мол\_а), а также частично Программы Президиума РАН № 9 «Экспериментальные и теоретические исследования объектов Солнечной системы и планетных систем звезд».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ferri, Francesca, et al. Dust devils as observed by Mars Pathfinder // J. Geophys. Res. Planets. 2003. 108.E12. P. 1991–2012.  
 Lacks D.J., Levandowsky A. Effect of particle size distribution on the polarity of triboelectric charging in granular insulator systems // J. Electrostatics 2007, V. 65. P. 107–112. DOI: 10:1016/j.elsat.2006.07.010.  
 Onishchenko O.G., Horton W., Pokhotelov O.A., Stenflo L. Dust devil generation // Physica Scripta. 2014. 89 (7), 075606.

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия  
 Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный, Россия