

Генерация пылевых смерчей (Dust Devils) как парадигма взаимодействия литосферы с атмосферой

Онищенко О. Г.

Похотелов О. А.

Институт физики Земли РАН

- Из бездны знаний мысли мча,
- Отбросив предрассудки,
- Продвинем физику смерча.
- И наша да горит свеча!
- Я это сочинил для шутки.

Предпосылки и мотивация. I

- **Перенос энергии и импульса литосферных возмущений в нейтральную атмосферу и далее в ионосферу одна из важнейших задач геофизики. Передаваемая энергия во многом определяют структуру и динамику явлений в окружающем Землю пространстве. В свою очередь, следствия таких воздействий, как землетрясения, извержения вулканов, ураганы и т. п. на атмосферу (нейтральную атмосферу и ионосферу) и геомагнитное поле могут быть дополнительным (к наземным наблюдениям) эффективным средством мониторинга процессов, связанных с крупномасштабными сейсмическими и метеорологическими катастрофами.**

Предпосылки и мотивация. II

- Неустойчивые слои атмосферы (неустойчиво стратифицированные слои или слои с сильными сдвиговыми течениями) наиболее чувствительны к наземным катастрофам. Поэтому, наиболее эффективен мониторинг именно в этих областях атмосферы.
- Наиболее часто неустойчивые слои наблюдаются (Sherman, Che, JASTP 2006; Zhao et al., JASTP 2003) в области мезопаузы (на высоте 70 – 105 км) и иногда наблюдаются в приземном слое. В результате развития неустойчивости возникают конвективные движения и генерируются внутренние гравитационные волны (ВГВ). Для общей модели атмосферы требуется предсказание мощности инъекции пыли в тропосферу от DDs, смерчей и пылевых бурь.

Пылевые смерчи

- Что такое пылевые смерчи. Где они наблюдаются. Каковы их характерные параметры.
- Физика пылевых смерчей.
- Обзор предыдущих моделей.
- Модифицированная модель вихря Бюргерса.

Пылевой дьявол



[watch-v=EpYDzdlI5PMU.url](https://www.youtube.com/watch?v=EpYDzdlI5PMU)



Генерация dust devils и теорема Гельмгольца ?!

- Уравнение движения

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla\left(\frac{p+U}{\rho}\right), \quad \frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla$$

$$\frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} = (\boldsymbol{\omega} \cdot \nabla)\mathbf{v}, \quad \boldsymbol{\omega} = \nabla \times \mathbf{v}$$

Теорема Гельмгольца

- Частицы, находившиеся когда-либо в безвихревом движении, будут находиться в нем все время

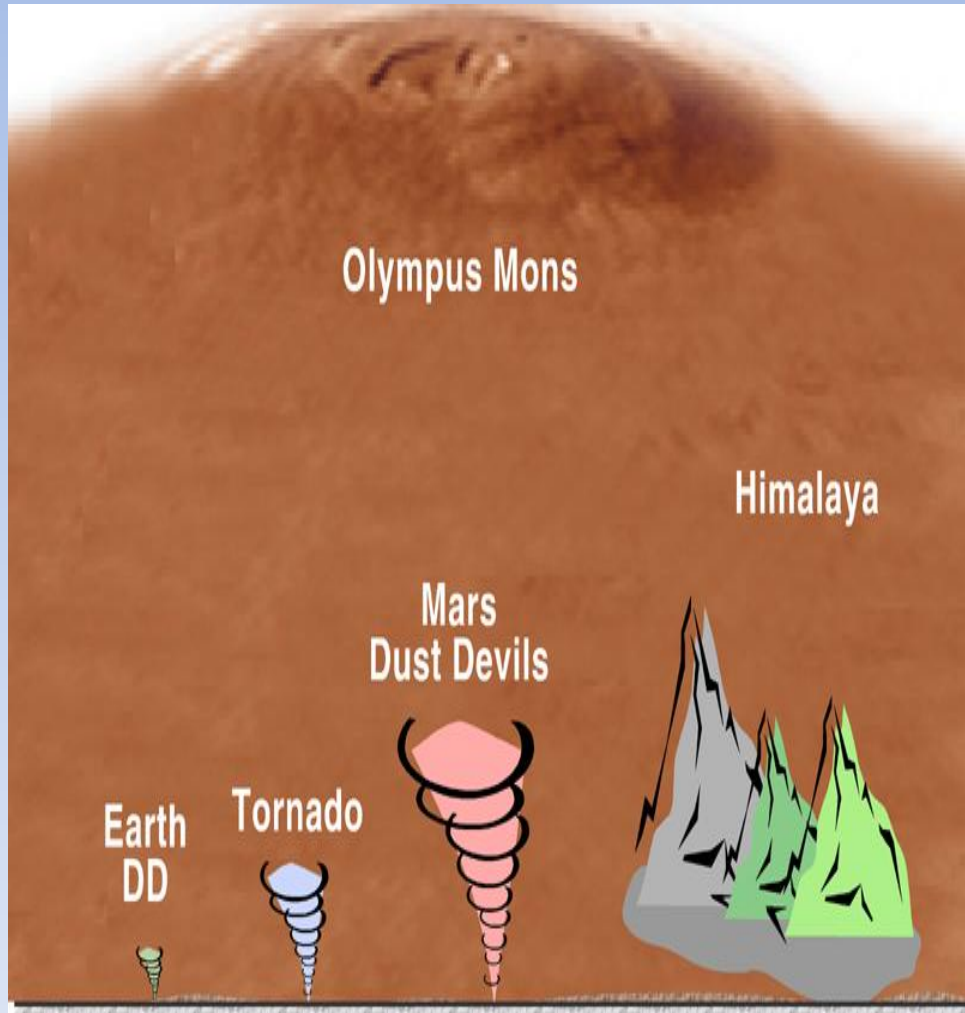
Пылевые смерчи. I

- Пылевые смерчи – кратковременные вихри с депрессией давления и повышенной температурой в центре. DDs принадлежат к семейству мелкомасштабных вихрей включая торнадо, наблюдаемых в различных районах Земли.
- Характерный радиус вихря порядка нескольких десятков метров, а высота порядка 600 м – 1 км. (В Австралии наблюдаются вихри с радиусом 30 – 140 м и высотой до 4500 м).
- В приземном слое, вблизи вихрей воздух характеризуется суперadiaбатическими градиентами температуры и плотности. В диапазоне высот от 10 до 300 см наблюдается градиент температуры порядка 1-10°С/м. Характерное время развития конвективной неустойчивости в таком слое 5-2 сек.

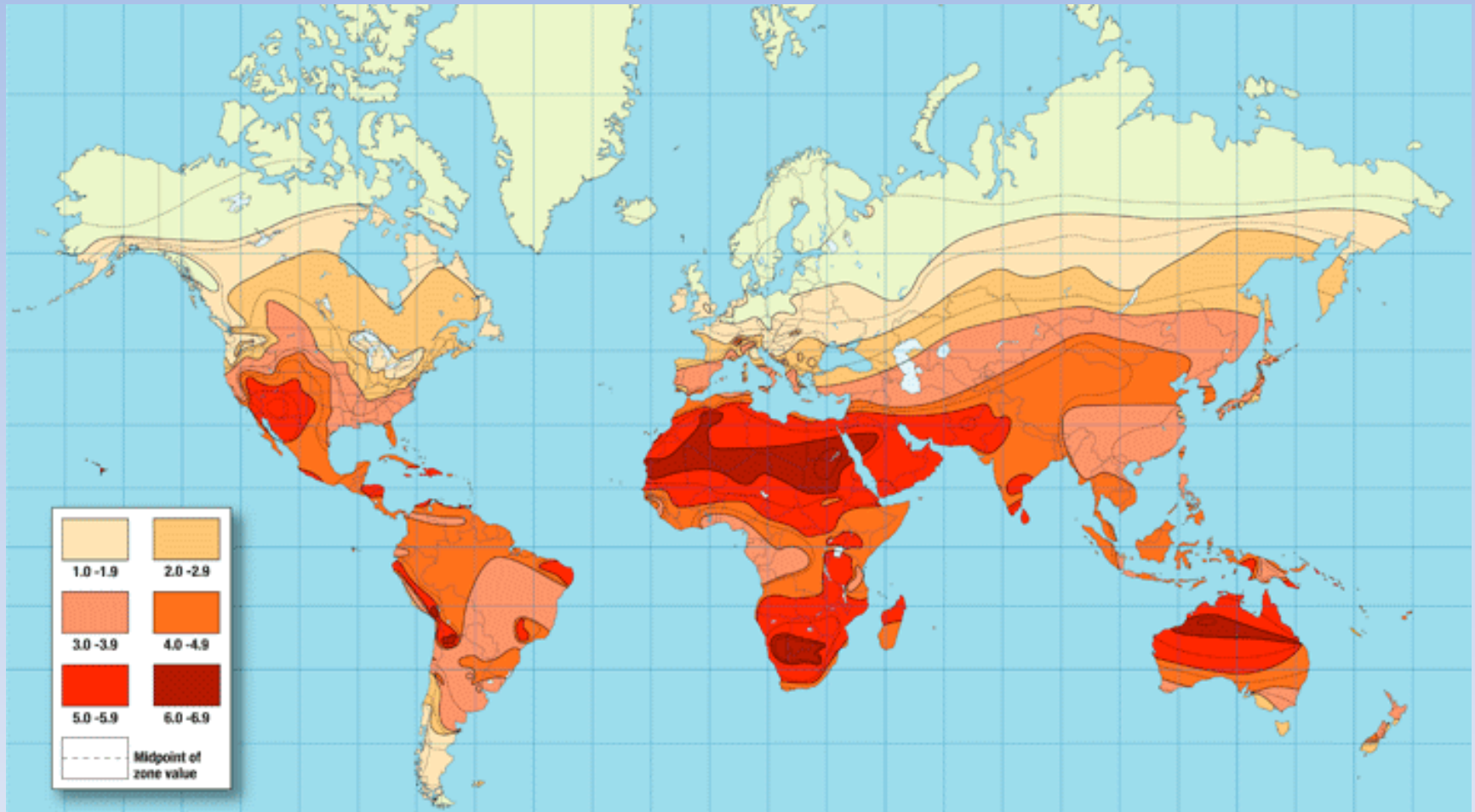
Пылевые смерчи. II

- Пылевые частицы (SiO_2 , аэрозоли), подхваченные вихрем, многократно сталкиваясь электризуются – трибоэлектрический эффект. Мелкие частицы приобретают отрицательный электрический заряд, а крупные – положительный. Вертикальная стратификация зарядов (легкие частицы вверху, а тяжелые внизу) служит причиной возникновения вертикального электрического поля в несколько kV/m .
- Тороидальное движение зарядов служит причиной генерации магнитного поля в несколько nT .
- DDs генерируют звуковые волны и радиоволны в килогерцевом диапазоне частот.
- Флуктуирующие в вихре заряды генерируют также электромагнитные волны в диапазоне частот 2 – 20 и 30 – 50 Hz.

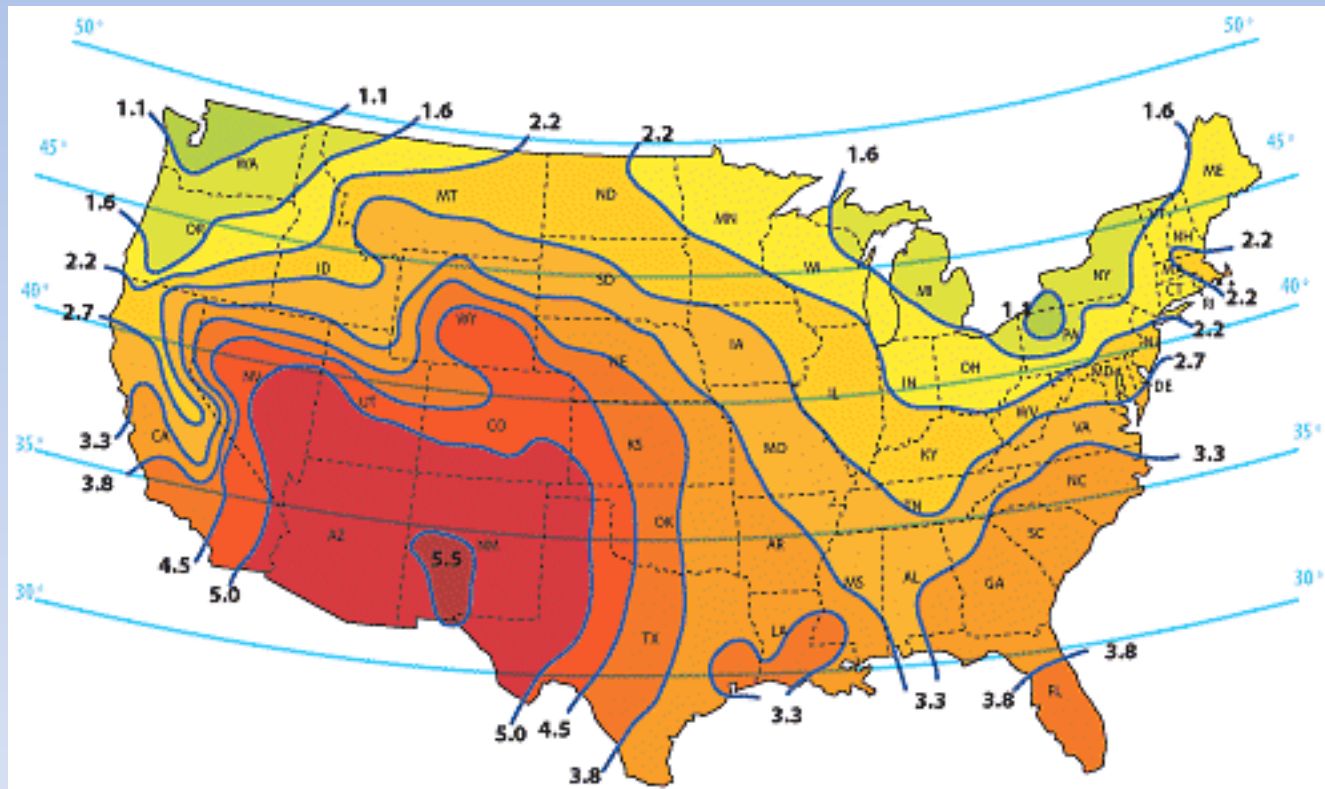
Что такое dust devils на Земле и на Марсе



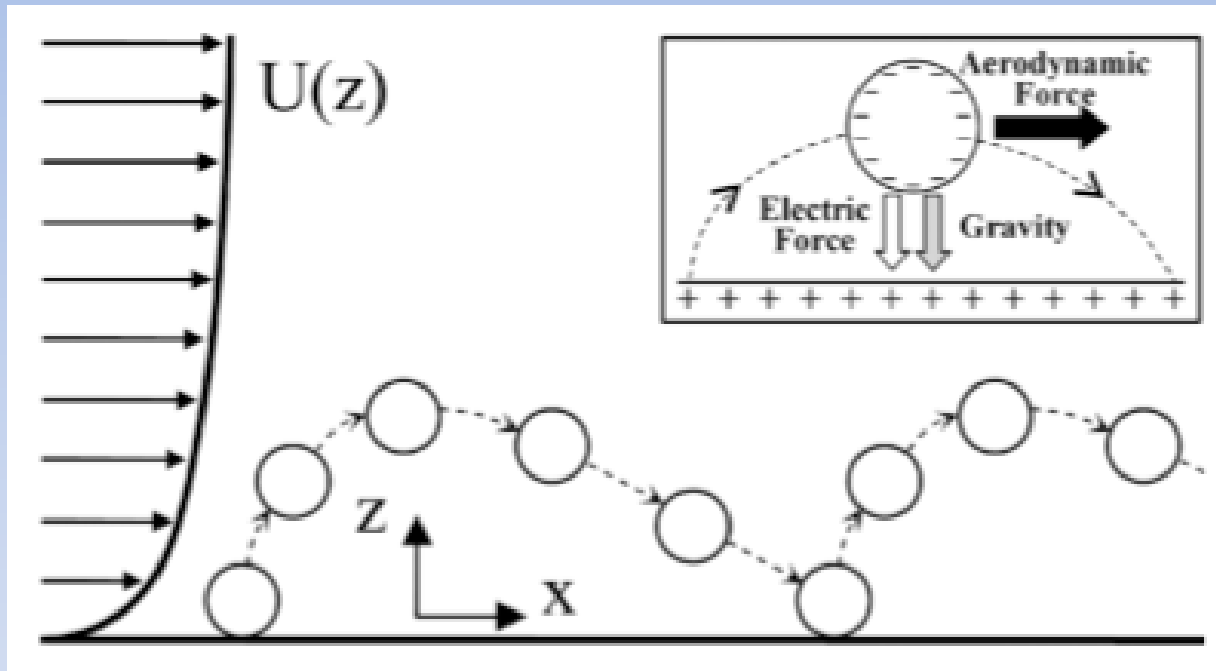
Регионы где наблюдаются DDs



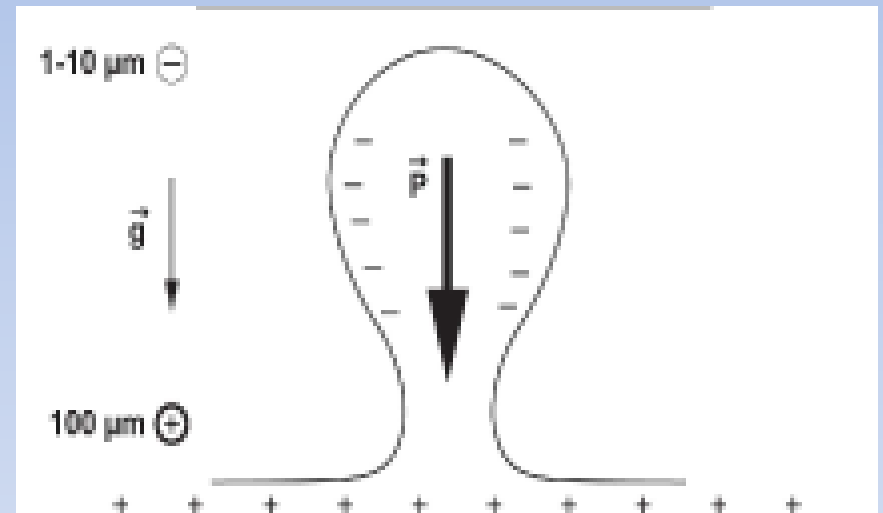
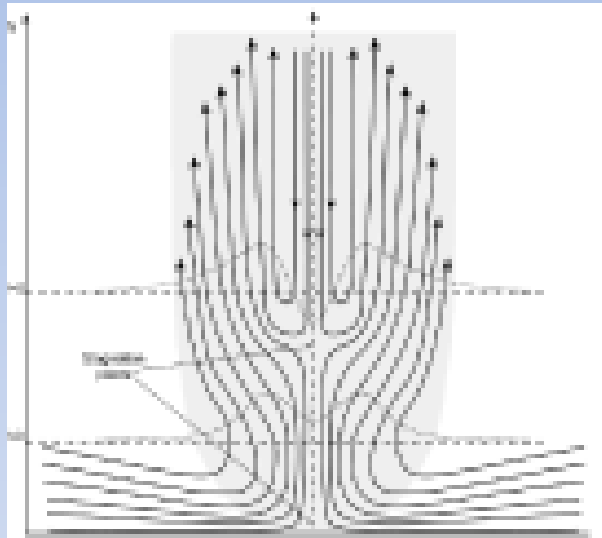
Районы США, где наблюдаются DDs



Силы действующие на пылинку



Трибоэлектрический эффект



Электрические поля

- Triboelectric interactions: Lighter grains (-) charged, Heavy Grains (+) charged [Ette, 1971]

- Light Grains blown upward in convective process - charge separation

- Create Electric Dipole Moment, M , and Dipolar Electric field

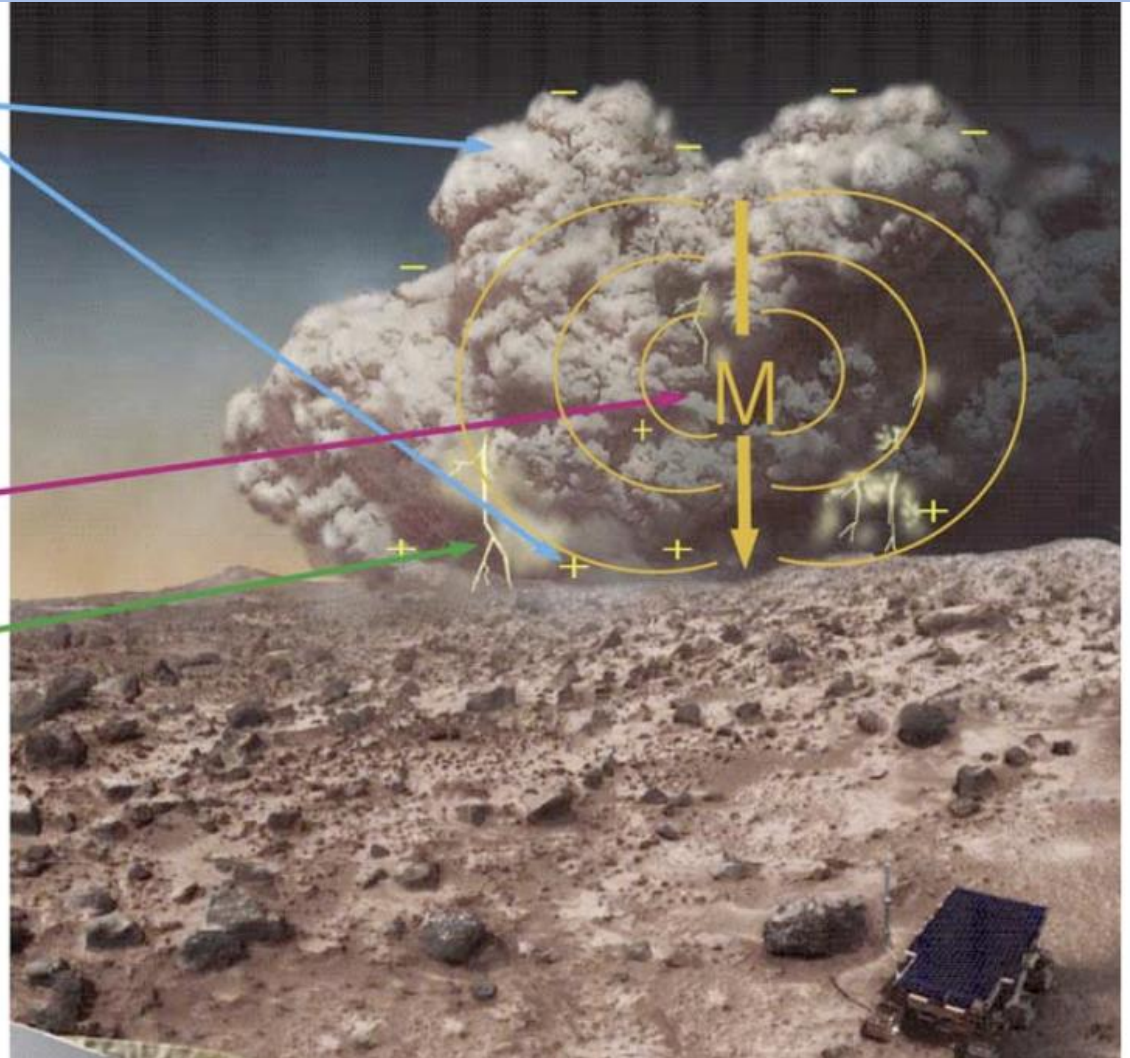
- Swirling grains = Change in Moment (dM/dt)

- Terrestrial Devils we see:

DC E-fields from M

Radio emission from dM/dt

Induced Potentials on Surfaces



Физические параметры DDs

Table 1. Expected VLF Emission Level for Martian Dust Devils of Various Intensities and for Two Terrestrial Situations

	Mars Dust Devil			Earth	
	Intense	Modest	Weak	Thunderstorm	Dust Devil
Density, e/cm^3	200	20	2	10^3	10^6
Radius, km	5	3	2	2.8	0.011
Height, km	10	7	5	5	0.1
Q_{dc} , C	25	0.6	0.02	20	5×10^{-3}
M , kC m	251	4.4	0.1	100	5×10^{-4}
E_{dc} at $r = 10$ km, V/m	2513	44	1.0	1000	0.005
Q_{ac} , C	2.5	0.06	0.002	3	5×10^{-4}
E_{VLF} at $r = 200$ km, V/m	8.0	0.14	0.003	4.5	1.5×10^{-6}

The storms are assumed to be cylindrically shaped, with radius r and height h .

Dust Devils: Предыдущие модели, недостатки.

- Renno et al (1998) Простая термодинамическая модель предсказывающая депрессию давления в смерче.
- Farrell et al (2006) Описание электростатических и гидростатических сил внутри пылевого облака. Модель движений среды, состоящей из двух типов частиц.
- Kok & Renno (2008, 2009) Развитие моделей согласованных с наблюдениями.
- Мало экспериментов по изучению DDs. Не существует удовлетворительной модели генерации DDs.

Модель вихря Бюргерса для DD

The Stream Function is

$$\phi(r, z) = \alpha r^2 z / 2$$

Which Gives

$$\mathbf{v} = \nabla \times \phi$$


$$v_r = -\alpha \frac{r^2}{2}$$

$$u_z = \alpha z$$


$$v_\theta = v_\theta(r).$$

Vorticity Equation For Viscous Fluid:

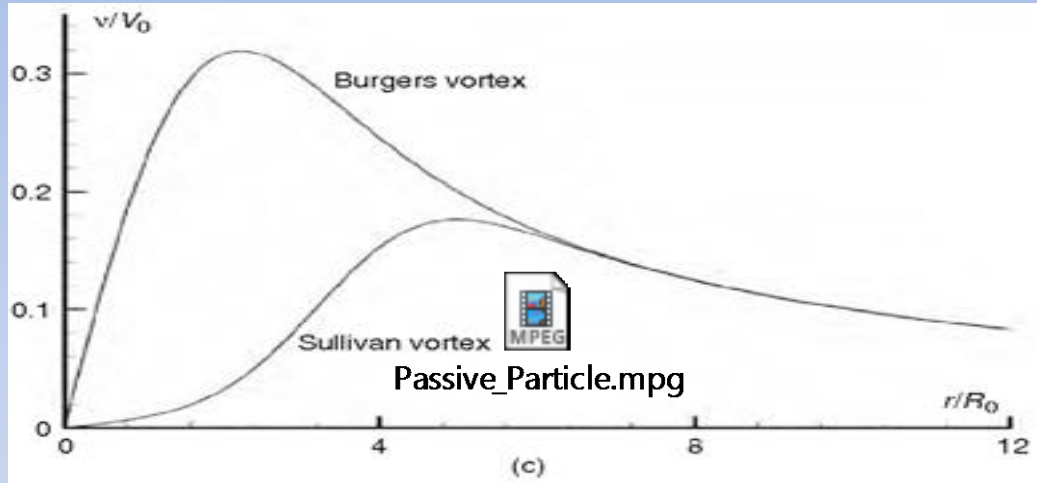
$$v_r \frac{d}{dr} \omega_z = \omega_z \frac{du_z}{dz} + \nu \frac{d}{r dr} \left(r \frac{d}{dr} \omega_z \right)$$


$$\nu \omega_z = \frac{\alpha \Gamma}{4\pi} \exp\left(\frac{-\alpha r^2}{4\nu}\right)$$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r v_\theta) \equiv \omega_z(r)$$


$$v_\theta = \frac{\alpha \Gamma}{2\pi r} \left(1 - \exp\left(\frac{-\alpha r^2}{4\nu}\right) \right)$$

Вихрь Бюргерса



$$v = \frac{\Gamma}{2\pi r} \left(1 - e^{-ar^2/2\nu}\right)$$

$$w = 2az$$

$$u = -ar$$

Предпосылка к модели Dust Devils

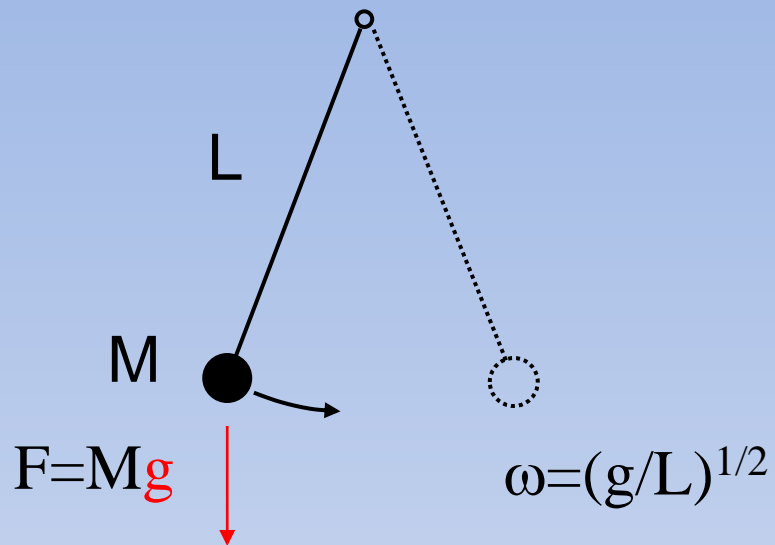
- Неординарное поглощение солнечной радиации служит причиной возникновения неустойчиво стратифицированного слоя атмосферы. В таком слое атмосферы зарождается мощная конвекция и осуществляется эффективный перенос энергии вверх. Можно ожидать, что именно конвекция является причиной генерации DDs.

Цель

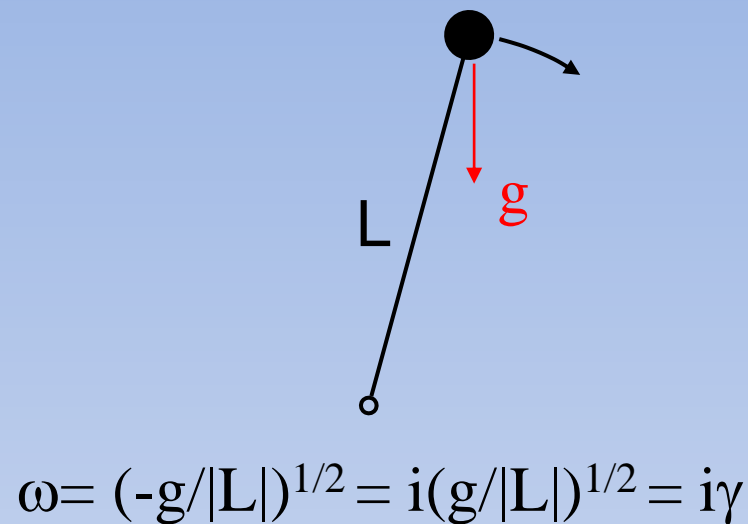
Вертикальный градиент температуры и сдвиговое зональное течение являются наиболее важными параметрами, определяющими динамику вертикального переноса и конвективной устойчивости DDs. Наша цель - изучить условия генерации DDs в неустойчиво стратифицированной атмосфере.

Трудности теоретического исследования. DD – трехмерная нестационарная структура.

Устойчивый маятник

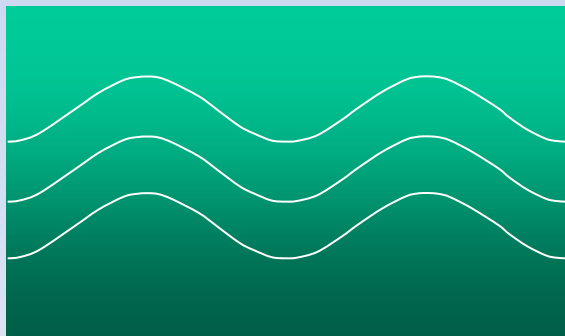


Неустойчивый маятник



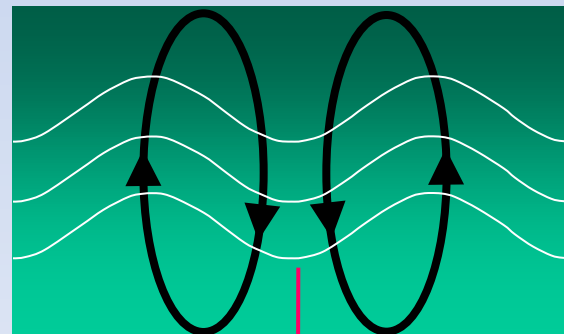
Устойчивая стратификация

$$L > 0$$



$$\omega = (g / L)^{1/2}$$

Неустойчивая стратификация
⇒ Рэлей – Тэйлоровская
неустойчивость



Инкремент $\gamma = (g/L)^{1/2}$

Устойчиво/неустойчиво стратифицированная атмосфера

$$\omega_g^2 = g \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma H} + \frac{1}{T} \frac{dT}{dz} \right)$$

$$\omega_g^2 = g \left(\frac{1}{L_a} - \frac{1}{L_T} \right)$$

устойчивая

$$|L_T| > L_a$$

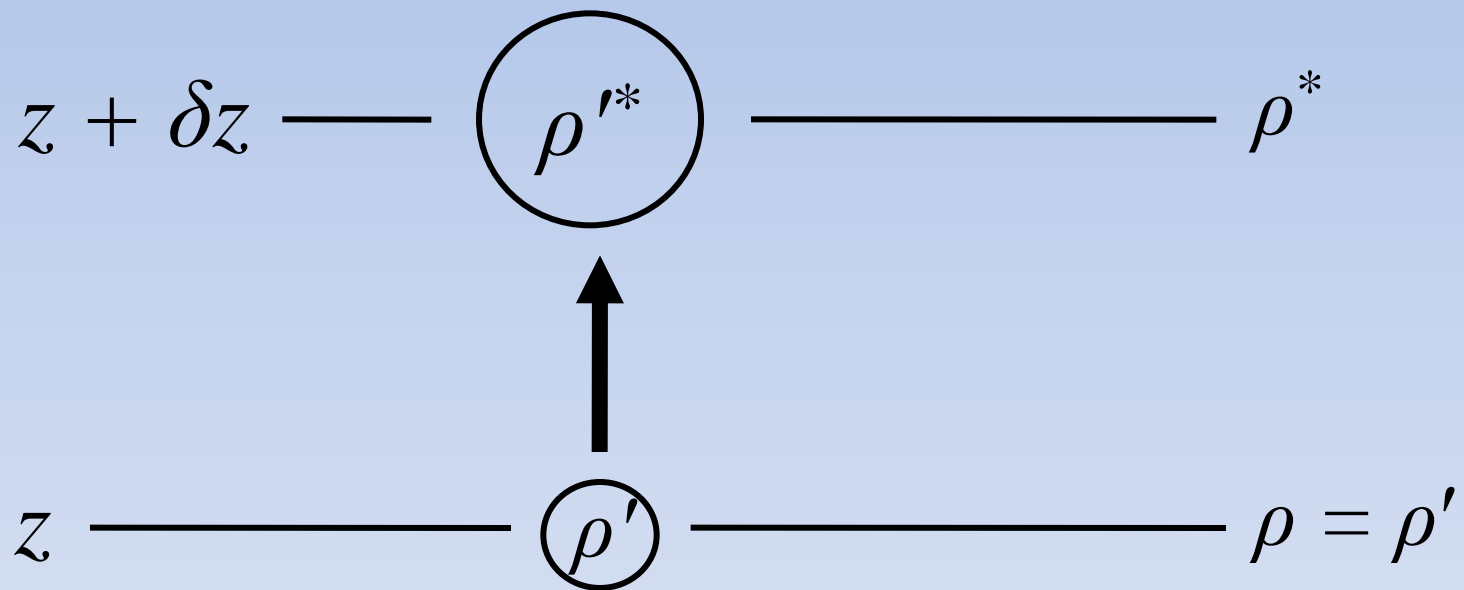
неустойчивая

$$L_T < 0 \quad L_T < L_a$$

нейтральная

$$L_T = L_a$$

Возникновение конвекции



Возникновение конвекции

Условие неустойчивости: $\rho'^* < \rho^*$, или

$$\rho'^* - \rho^* = \left[\left(\frac{d\rho}{dz} \right)_{\text{ad}} - \frac{d\rho}{dz} \right] \delta z < 0, \quad \text{или} \quad \left(\frac{d\rho}{dz} \right)_{\text{ad}} < \frac{d\rho}{dz} < 0$$

Уравнение состояния: $\frac{p}{\rho} = \frac{R}{\mu} T$

При условии баланса давлений ($p'^* = p^*$) и $\mu = \text{const}$:

$$\left(\frac{dT}{dz} \right)_{\text{ad}} - \frac{dT}{dz} = - \frac{T}{\rho} \left[\left(\frac{d\rho}{dz} \right)_{\text{ad}} - \frac{d\rho}{dz} \right] > 0$$

Возникновение конвекции

$$0 > \left(\frac{dT}{dz} \right)_{\text{ad}} > \frac{dT}{dz} \quad \Rightarrow$$

Условие (критерий) К. Шварцшильда (1906):

$$\left| \frac{dT}{dz} \right| > \left| \left(\frac{dT}{dz} \right)_{\text{ad}} \right|$$



Карл Шварцшильд. 1873–1916 гг. ШВАРЦШИЛЬД, КАРЛ (Schwarzschild, Karl), немецкий астроном, один из основоположников теоретической астрофизики. Родился 9 октября 1873 во Франкфурте-на-Майне (Германия). Рано проявил научные способности, опубликовав в 16 лет работу по небесной механике. Его работы по теории относительности содержали первые точные решения полевых уравнений общей теории относительности. Решение Шварцшильда было первым точным решением уравнений Эйнштейна с классической чёрной дырой. Поэтому несколько терминов из физики чёрных дыр получили его имя, например радиус Шварцшильда, Шварцшильдовы координаты и так далее.

(Необходимое) условие конвективной неустойчивости

Обозначим $\nabla = \frac{d \ln T}{d \ln p} = \frac{p}{T} \frac{dT}{dp}$. Поскольку

$$dp = -\rho g dz = -p \frac{\mu g}{R T} dz = -p \frac{dz}{H_p}, \quad \text{где } H_p = \frac{R T}{\mu g} \text{ —}$$

высота однородной атмосферы (шкала высот — scale height) для давления ($T = \text{const} \Rightarrow p = p_0 e^{-\frac{z}{H_p}}$), то

$$\nabla = -\frac{H_p}{T} \frac{dT}{dz}. \quad \text{Другая запись условия Шварцшильда:}$$

$$\nabla > \nabla_{ad}$$

Безразмерный изэнтропический градиент температуры

$$\nabla = \frac{d \ln T}{d \ln p} = \frac{p}{T} \frac{dT}{dp} \quad \frac{p}{\rho} = \frac{R}{\mu} T \quad \ln T = \ln p - \ln \rho + c_1$$

Адиабатический процесс: $\frac{p}{\rho^\gamma} = \text{const}$

$$\ln p - \gamma \ln \rho = c_2 \quad \gamma \ln T = \gamma \ln p - \gamma \ln \rho + \gamma c_1$$

$$\ln T = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \ln p + c_3$$

$$\nabla_{\text{ad}} = \frac{\gamma - 1}{\gamma}$$

Модельное гидродинамическое описание DDs. Модификация уравнения завихренности из теоремы Гельмгольца

$$\frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} = (\boldsymbol{\omega} \cdot \nabla) \mathbf{v} + \frac{1}{\rho^2} (\nabla p \times \nabla \rho) \quad d\theta / dt = 0$$

$$d / dt = \partial / \partial t + \mathbf{v} \cdot \nabla \quad \boldsymbol{\omega} = \nabla \times \mathbf{v} \quad \theta = p / \rho^\gamma$$

$$\mathbf{v} = (v_r, v_\varphi, v_z) \quad \mathbf{v} = \mathbf{v}_\perp + \mathbf{e}_\varphi v_\varphi \quad \mathbf{v}_\perp = \nabla \psi \times \nabla \varphi$$

$$v_r = -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \quad v_z = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r}$$

Уравнение типа Грэда – Шафранова для DDs (модификация вихря Бюргерса)

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} \Delta^* \psi = -\omega_g^2 \left(r \frac{\partial}{\partial r} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \right) \psi$$

$$\Delta^* = r \frac{\partial}{\partial r} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad \omega_g^2 = g \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma H} + \frac{1}{T} \frac{dT}{dz} \right)$$

$$\psi = \frac{\alpha r^2 z}{2} \exp(\gamma t - r^2 / r_0^2) \quad \gamma = -i\omega_g$$

Модельное гидродинамическое описание DDs. III

$$v_r = -\frac{\alpha r}{2} \exp(\gamma t - r^2 / r_0^2) \quad v_z = \alpha z (1 - r^2 / r_0^2) \exp(\gamma t - r^2 / r_0^2)$$

$$\omega_\varphi = \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial r} = \frac{2\alpha r z}{r_0^2} \left(2 - \frac{r^2}{r_0^2} \right) \exp(\gamma t - r^2 / r_0^2)$$

$$\frac{\partial \omega_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial \omega_{z0}}{\partial r} = \omega_{z0} \frac{\partial v_z}{\partial z}$$

Модельное гидродинамическое описание DDs. IV

$$\frac{\partial \omega_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial \Omega_{z0}}{\partial r} = \Omega_{z0} \frac{\partial v_z}{\partial z} \quad \Omega_{z0} = \Omega [1 - \exp(r^2 / R^2)]$$

$$\omega_z(r, t) = \frac{\alpha \Omega}{\gamma} \frac{r^2}{R^2} \left(2 - \frac{r^2}{r_0^2} \right) \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2} \right) \exp(\gamma t)$$

$$-\omega_g^2 = \gamma^2 = \frac{g}{L_T}$$

Оценки

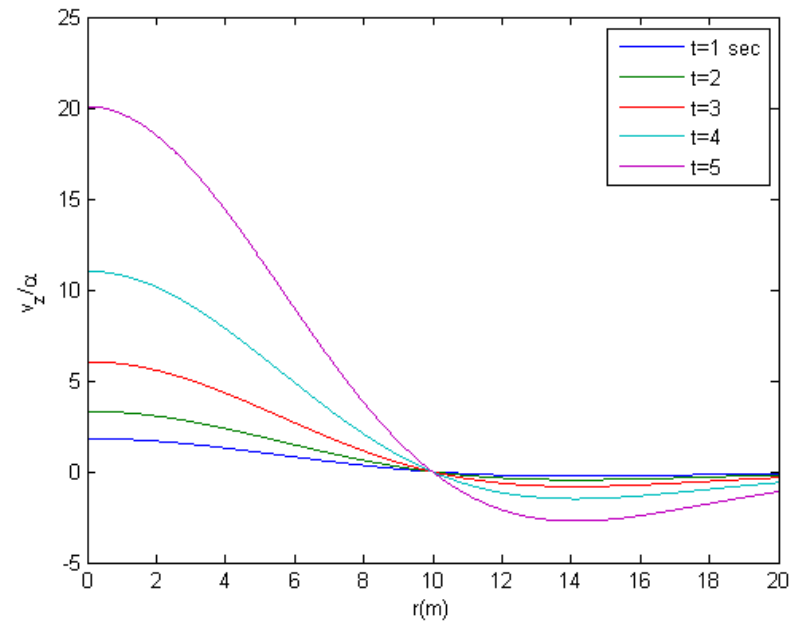
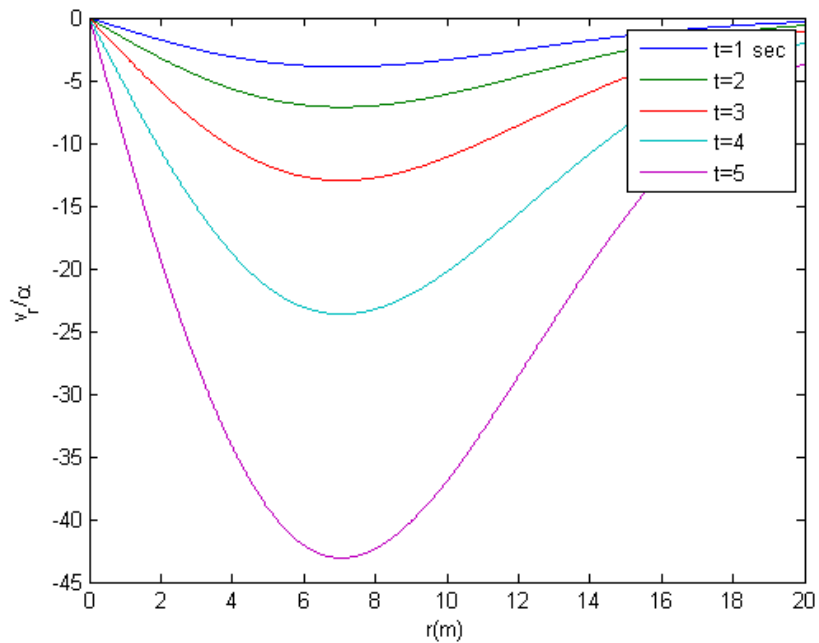
$$-\omega_g^2 = \gamma^2 = \frac{g}{L_T} \quad |\nabla T| \approx 10 \text{ C/m}$$

$$L_T = T / |\nabla T| = 300 / |\nabla T| = 30 \text{ m}$$

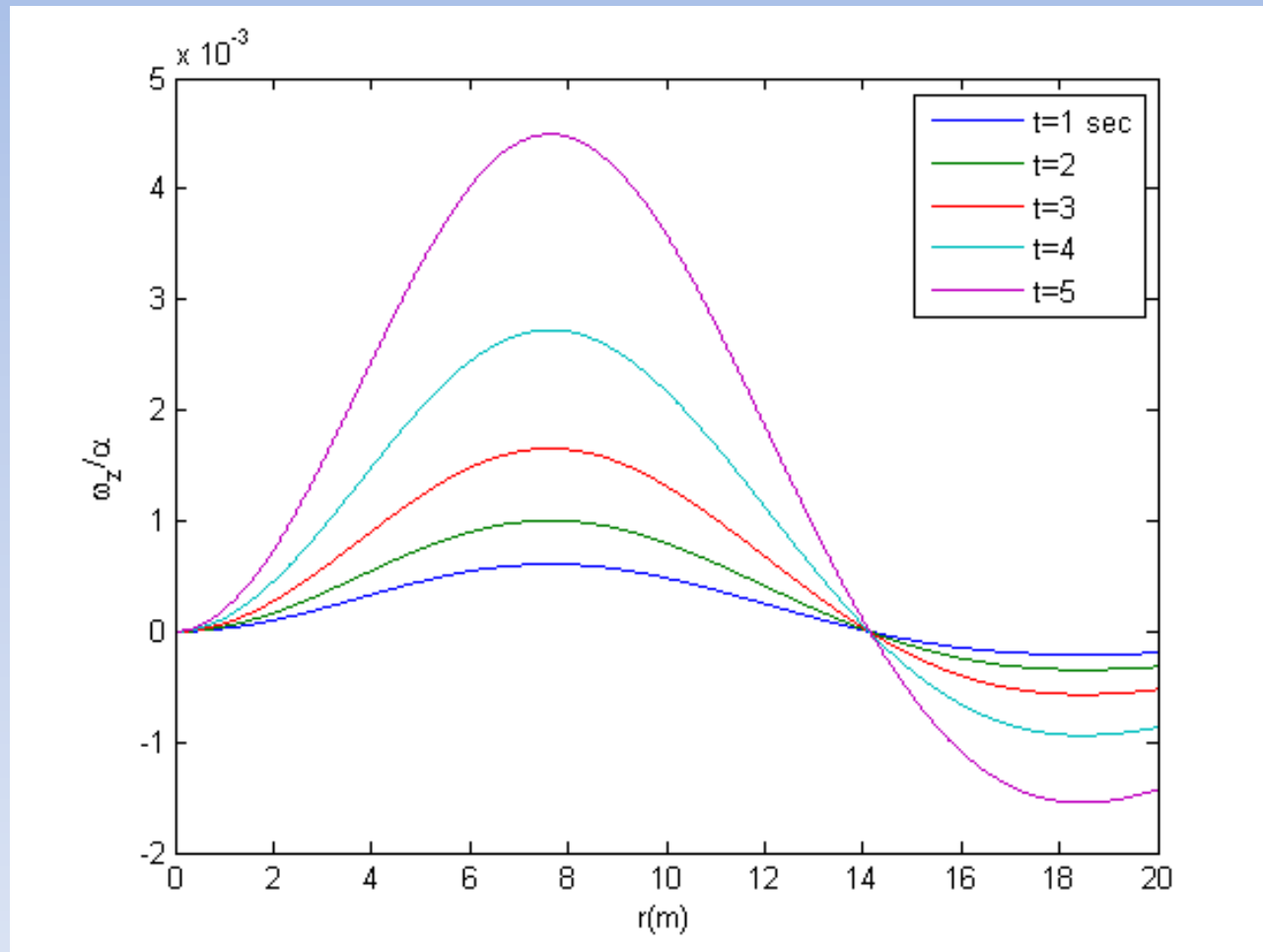
$$\gamma = 0,6 \text{ sec}^{-1} \quad \Omega = 0,012 \text{ sec}^{-1} \quad \gamma / \Omega = 50$$

$$r_0 = 10 \text{ m} \quad R = 50 \text{ m} \quad v_{\varphi 0} = \Omega \cdot R = 0,6 \text{ m/sec}$$

Радиальная и вертикальная компоненты скорости в вихре



Тороидальная завихренность



Dust Devils: Energy Calculations

- Estimating the Energy and Power of a Dust Devil

$$E_{\theta} = \int \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} V_{\theta}^2(r) 2\pi r dr h = \pi r_1^2 h \rho V_1^2 \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)$$

$$V_1 = V_{\theta}(r_1) \sim 30 \text{ m/s} \sim 60 \text{ mph}$$

$$r_{1\text{mars}} \sim 100 \text{ m}$$

$$V_2 = V_{\theta}(r_2) \sim U_{\text{atm}} \sim 6 \text{ m/s}$$

$$\rho_{\text{mars}} \sim 1/80 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{air}} \cong 1 \text{ kg/m}^3$$

$$V_{1\text{mars}} \sim 90 \text{ m/s} \sim 200 \text{ mph} (?)$$

$$\frac{1}{2} \rho_{\text{air}} V_1^2 \sim 10^3 \text{ J/m}^3$$

$$V_{2\text{mars}} \sim 30 \text{ m/s} \sim 60 \text{ mph}$$

$$E_{\theta} \sim \pi r_1^2 h \rho V_1^2 \sim 3 \times 10^6 \text{ J}$$

$$E_{\theta} \sim 1 \times 10^{10} \text{ J}$$

$$P_{\text{mars}} \sim 10^6 - 10^8 \text{ kW}$$

The Power to Create Or Stop a Dust Devil in 10 min $\sim 5 \text{ kW}$

Оценки параметров DDs

Dust Devils: Sand Flux Estimation

$$F_{\text{sand}} \leq n_{\text{sand}} V_2$$

$$P_{\text{lift}} = g m_s n_s \pi r_1^2 V_z = \rho_s g \pi r_1^2 V_z$$

$$V_z = 10 \text{ m/s and } r_1 = 10 \text{ m}$$

$$\rho_s = |g| \text{cm}^3 = 10^{+3} \text{ kg/m}^3$$

$$P_{\text{lift}}(\text{max}) \sim 3 \times 10^4 \text{ kW}$$

This agrees well
with measured
Saltation flux
(Gorchakov, 2008)



$\sim 3 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^3\text{s}$ is lifted into the air on Earth
 $\sim 1 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^3\text{s}$ is lifted into the air on Mars

Публикации

- **O. G. Onishchenko, W. Horton, O. A. Pokhotelov and L. Stenflo, Dust devil generation, *Physica Scripta*, 2014.**
- **W. Horton, H. Miura, O. Onishchenko, et al., Dust Devil Dynamics, *J. Geophys. Res.*, 2014.**

Нелинейные структуры ВГВ.

Устойчивость, вихри, зональные течения

- Онищенко О., Похотелов О. Генерация зональных структур внутренними гравитационными волнами в земной атмосфере, *ДАН*, 2012.
- Onishchenko O., Pokhotelov O., Fedun V., Convective cells of inertial gravity waves in the Earth's atmosphere with finite temperature gradient *Ann. Geophys.*, 2013.
- Onishchenko O., et al., Rolls of the internal gravity waves in the Earth's atmosphere, *Ann. Geophys.*, 2014.
- Онищенко О., Похотелов О., Федун В., Конвективные ячейки внутренних гравитационных волн в земной атмосфере, *ДАН*, 2014.

DDs – тепловая машина

- Источником тепловой машины является солнечная радиация. DDs преобразуют энергию солнечного излучения в вихревое движение в атмосфере.

Генерация DDs как естественная реакция «Живого Организма “Утомленной Солнцем” Земли»

- В приповерхностных областях Земли, где необычайно сильна солнечная радиация, генерируются DDs, оберегающие поверхность Земли от перегрева.

Строящаяся в Марселе экспериментальная установка

Parameters of the proposed experiments

Cylinder height	1.5-2.0 m
Cylinder diameter	0.75-1 m
lower electrode	metal
top electrode	conductive glass
lower electrode temperature	300-400 K
upper electrode temperature	300 K
Electrode bias	0-1 kV
Particle size	10-1000 μm
Diagnostics	laser sheet, high speed video camera.

Human Exploration and Development of Space [HEDS] program and Martian Atmosphere and Dust in the Optical and Radio [MATADOR] team

- Резкое ухудшение работы солнечных батарей станций на Марсе, связанное с частым прохождением гигантских DDs в области наблюдения, стимулировало NASA создать международный коллектив ученых (13 человек) HEDS и MATADOR. Целью команды MATADOR является комплексное изучение DDs на Земле и на Марсе.
- По данным MATADOR вертикальная компонента электрического поля в DDs в штатах Невада и Аризона достигала нескольких kV/m , тороидальная скорость порядка $10 m/s$, магнитное поле порядка нескольких nT , соответствующая плотность заряда составляла 10000 электронов в кубическом метре.

Заключение

- **Предложена новая гидродинамическая модель генерации DDs, объясняющая основные особенности наблюдений.**
- **Выявлена роль отдельных необходимых элементов для генерации DDs:
неравновесная стратификация
приповерхностного слоя атмосферы и
существование крупномасштабной
тороидальной завихренности.**

- **Мираж в пустыне,**
- **Солнце в Зените,**
- **Песок раскалился,**
- **Земля уже плавится.**

- **Пыль поднимается и кружится в непрерывающемся танце.**
- **Порой в ней Дьявол африканцу чудится,**
- **Как, впрочем, в каждом белом иностранце.**

