

О вертикальном выносе пыли в конвективно-неустойчивом пограничном слое атмосферы

М.В. Курганский

***Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова
Российской академии наук, Пыжевский пер. д. 3,
119017 г. Москва (e-мейл: kurgansk@ifaran.ru)***

НИВЦ МГУ им. М.В. Ломоносова, 06 марта 2013 года

План доклада

- Предисловие + введение
- Соотношение между плотностью вертикального потока массы песка (пыли) Q в конвективном пограничном слое атмосферы, плотностью числа конвективных элементов (включая вихри) N , скоростью трения u_* и вертикальным (турбулентным) потоком плавучести B
- Зависимость плотности числа конвективных элементов N от метеорологических/физических параметров конвективно-неустойчивого погранслоя
- Два прямых метода определения N в случае, когда конвективные элементы в погранслое представлены в основном пыльными вихрями
- Заключительные замечания

Плотность вертикального потока пыли в конвективных условиях

$$Q \left[\text{kg m}^{-2} \text{sec}^{-1} \right] = \frac{\rho \left[\text{kg m}^{-3} \right] \times B^* \left[\text{m}^2 \text{sec}^{-3} \right]}{g \left[\text{m sec}^{-2} \right]}$$

$$B^* = f(N, u_*, B) = N f_1(u_*, B)$$

$$B^* = C N u_*^6 B^{-1}$$

Размерностные
соображения

$$Q = C N \frac{\rho u_*^6}{g B} = C N \frac{\rho}{g} \kappa^2 (-L)^2 B = C N \frac{\rho}{g} u_*^3 \kappa (-L)$$

Масштаб
Обухова

$$L = -u_*^3 / \kappa B \quad \kappa = 0.4$$

Модельные соображения

Формула Бэгнольда для «твердого расхода»
пылевихревого потока

Bagnold
(1941)

$$q = C(d) \frac{\rho}{g} u_*^3 \quad C(d) = C_0 \sqrt{d/d_0} \quad C_0 = 1.5 - 2.8 \quad d_0 = 250 \mu\text{m}$$

«Перехват» горизонтального потока пыли
конвективными элементами

$$Q = k(d) C(d) \frac{\rho}{g} Nu_*^3 \bar{D}$$

$$k(d) \leq 1 \quad \bar{D} \sim -2L$$

$$Q = \frac{2}{\kappa} k(d) C(d) N \frac{\rho u_*^6}{g B}$$

$$C = \frac{2}{\kappa} k(d) C(d) \equiv \frac{2}{\kappa} k(d) C_0 \sqrt{\frac{d}{d_0}} \quad k(d) \approx 1 \quad d = 10 \mu\text{m} \quad C \approx C_0 = 1.5 - 2.8$$

Плотность числа конвективных элементов

$$N = C_1 B (h/H_0)$$

$$H_0 = c_p T_0 / g \approx 30 \text{ km} \quad h = 3 \text{ km} \quad B = 1.67 \times 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ sec}^{-3}$$

$$N = 50 \text{ km}^{-2}$$

$$H = 500 \text{ W m}^{-2}$$

$$C_1 = 3 \times 10^{-2} \text{ m}^{-4} \text{ sec}^3$$

Sinclair (1966, 1969)
Rennó et al. (1998)
Вульфсон (1961)

Сравнение с наблюдениями

Теоретическая оценка

$$Q_{\text{theor}} = C_0 C_1 \frac{\rho}{g} u_*^6 \frac{h}{H_0} \approx 6 \times 10^{-4} u_*^6 \text{ kg m}^{-2} \text{ sec}^{-1} \quad C_0 = 2$$

$$u_* = 0.23 \text{ m sec}^{-1} \quad Q_{\text{theor}} = 60 \mu\text{gr m}^{-2} \text{ sec}^{-1}$$

$$T = 10^4 \text{ sec} \quad M_{\text{theor}} \sim 150 \text{ kg km}^{-2}$$

Экспериментальные результаты

$$Q_{\text{exp}} = 3.16 \times 10^{-18} u_*^{5.95} \text{ gr cm}^{-2} \text{ sec}^{-1} \quad u_* \left[\text{cm sec}^{-1} \right]$$

$$Q_{\text{theor}} = 6 \times 10^{-17} u_*^6 \text{ gr cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$$

$$Q_{\text{exp_max}} = 50 \mu\text{gr m}^{-2} \text{ sec}^{-1}$$

Gillette & Passi
(1988); см.
также Семенов
(2011)

Klose & Shao
(2012)

Альтернативная формулировка

Теоретическая оценка

$$d(N_B^2 h^2 / 2) / dt = B$$

$$h^2 \approx (2 / N_B^2) B t$$

$$Q = CC_1 \sqrt{2} \frac{\rho}{g N_B H_0} \frac{t^{1/2}}{u_*^6} B^{1/2}$$

$$Q = CC_1 \sqrt{2} \frac{\rho}{g N_B H_0} \frac{t^{1/2}}{u_*^{6.5} b_*^{0.5}} \quad b_* \equiv g T_* / T_0$$

$$N_B = 10^{-2} \text{ sec}^{-1} \quad t = 10^4 \text{ sec} \quad T_* = 0.1 \text{ K}$$

$$Q_{\text{theor}} \approx 4.2 \times 10^{-4} k(d) (d/d_0)^{0.5} u_*^{6.5}$$

Экспериментальные результаты

Klose & Shao
(2012)

$$d = 210 - 270 \mu\text{m}$$

$$d = 105 - 108 \mu\text{m}$$

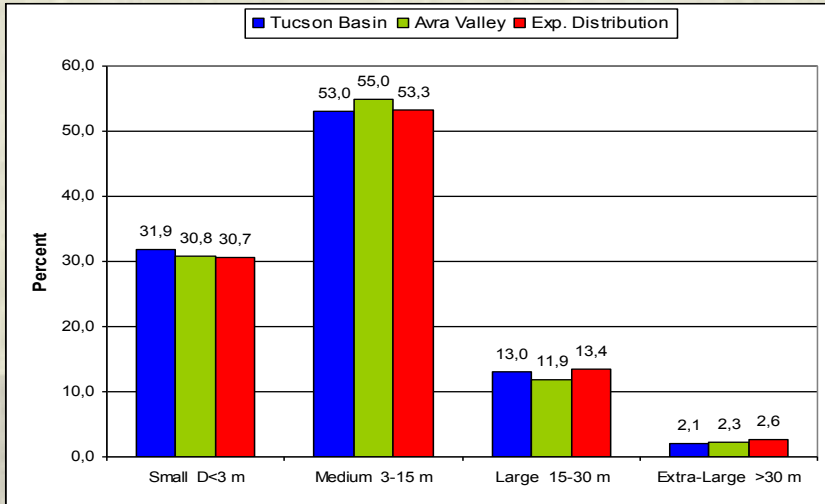
$$Q_{\text{exp}} = 5.1 \times 10^{-6} u_*^{6.5}$$

$$Q_{\text{exp}} = 1.41 \times 10^{-4} u_*^{6.5}$$

крупный песок

мелкий песок

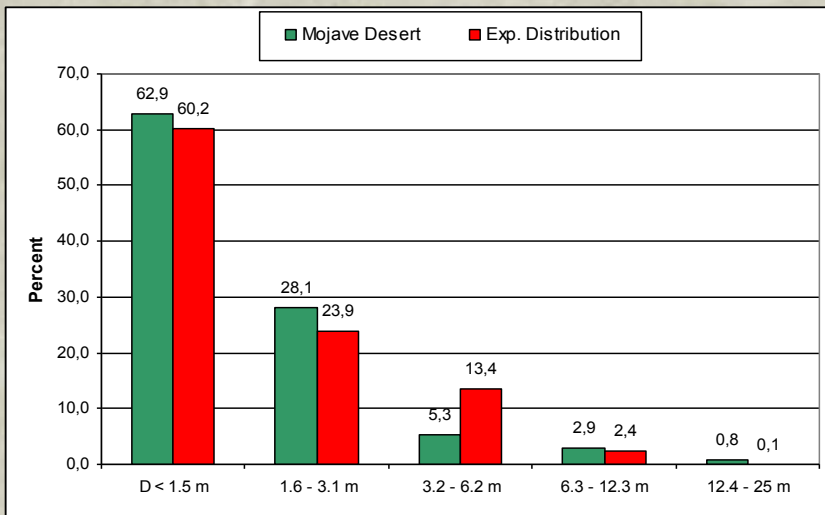
Dust devil statistics (I)



The method of statistical inference by Jaynes (1957): maximization of the Shannon informational entropy

$$P(> D) = \exp(-D/D_1)$$

$$D_1 \sim 2|L|, \quad L - \text{Obukhov scale}$$

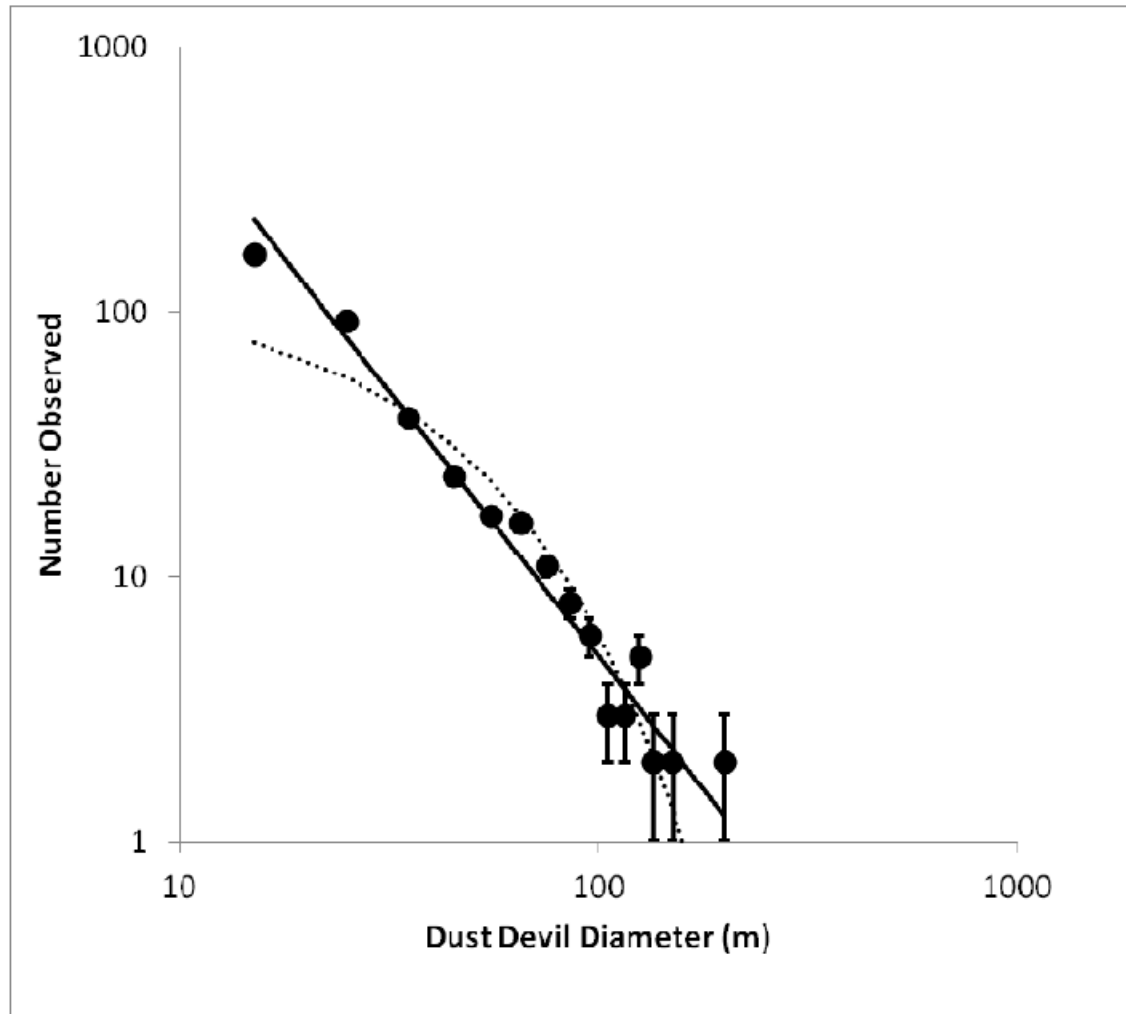


Distribution of a number of dust devils (%) in Tucson Basin & Avra Valley (Sinclair, 1966) according to their diameter D (m) and the exponential distribution (%) for $D_1=8.3$ m (Kurgansky, 2006); the same for the Mojave Desert in Southern California (Carroll & Ryan, 1970) for $D_1=1.7$ m

Dust devil statistics (II)

$$N(> D) = kD^{-1}$$

Distribution of Martian dust devils on linear diameters (“Mars Exploration Rover (MER) Spirit”; Greeley et al., 2006, 2010) : the solid line shows the “minus 1” power law; the dotted line stands for the exponential dependency (Lorenz, 2009)



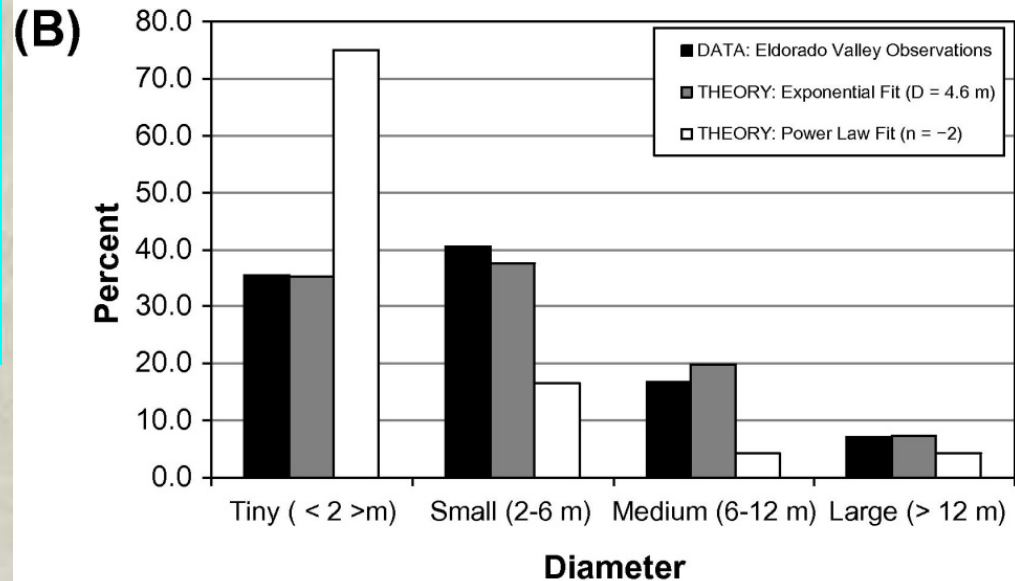
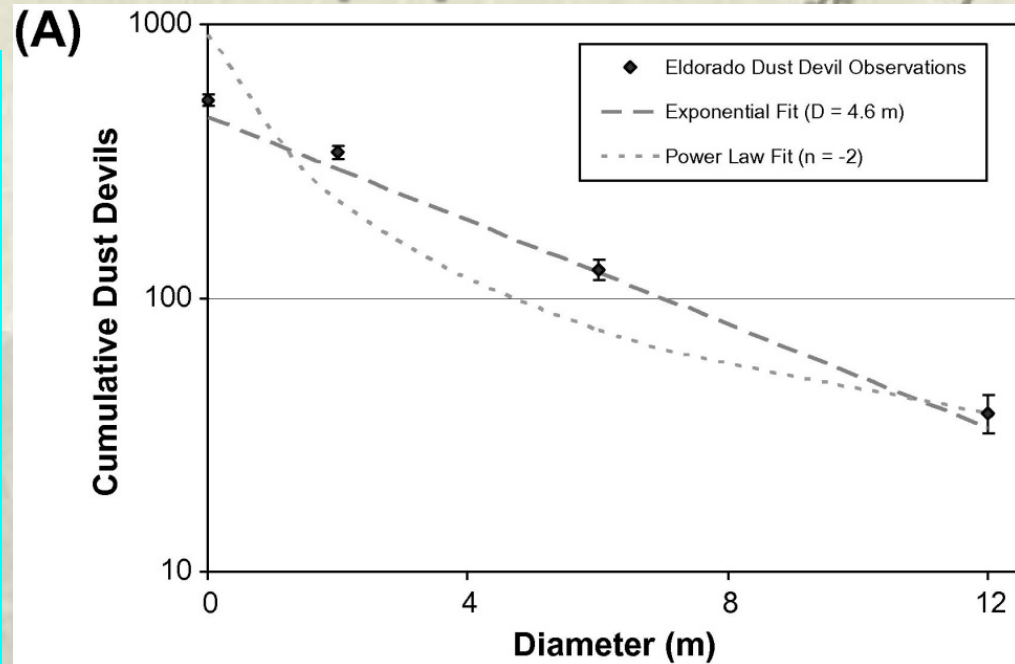
Ronald Greeley (1939–2011)

Dust devil statistics (III)

(A) Cumulative number of dust devils N exceeding a given diameter D . Filled circles correspond to the survey of 528 dust devils in Eldorado Valley: error bars represent standard \sqrt{N} error. For the $A = 0.55 \text{ km}^2$ survey area, the cumulative form (short-dashed line, $R^2 = 0.838$) of the power law distribution does not fit the observations so well as the cumulative form (long-dashed line, $R^2 = 0.999$) of the exponential function for $D_1 = 4.6 \text{ m}$.

(B) Histogram showing differential dust devil size distribution, expressed as a percentage of the total number of dust devils observed/predicted in each diameter bin. From left to right (within each diameter bin) bars correspond to: Eldorado survey of 528 dust devils; exponential function; and power law. The value of the decay parameter that produces the best fit to the observed Eldorado differential distribution is $D_1 = 4.6 \text{ m}$ ($R^2 = 0.98$).

FROM: Pathare et al. , 2010; Figure 1 and legend to it



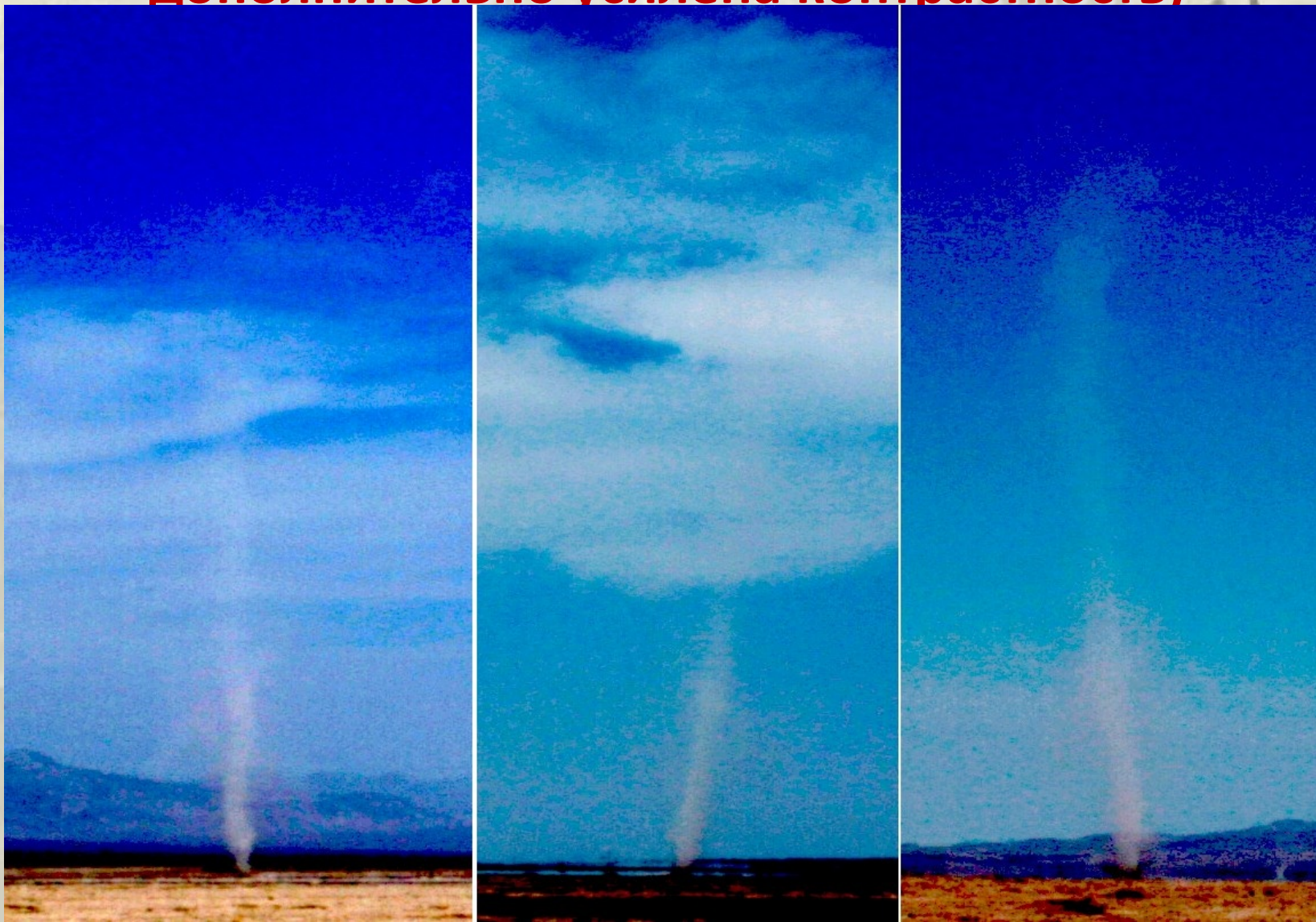
Наблюдательный треугольник с 3 фотокамерами



Наблюдения пыльных вихрей; пункт #1



**Один и тот же пыльный вихрь, снятый 15/01/2009
в 14:15 тремя фотокамерами 1, 2 и 3 (на снимках
дополнительно усилена контрастность)**



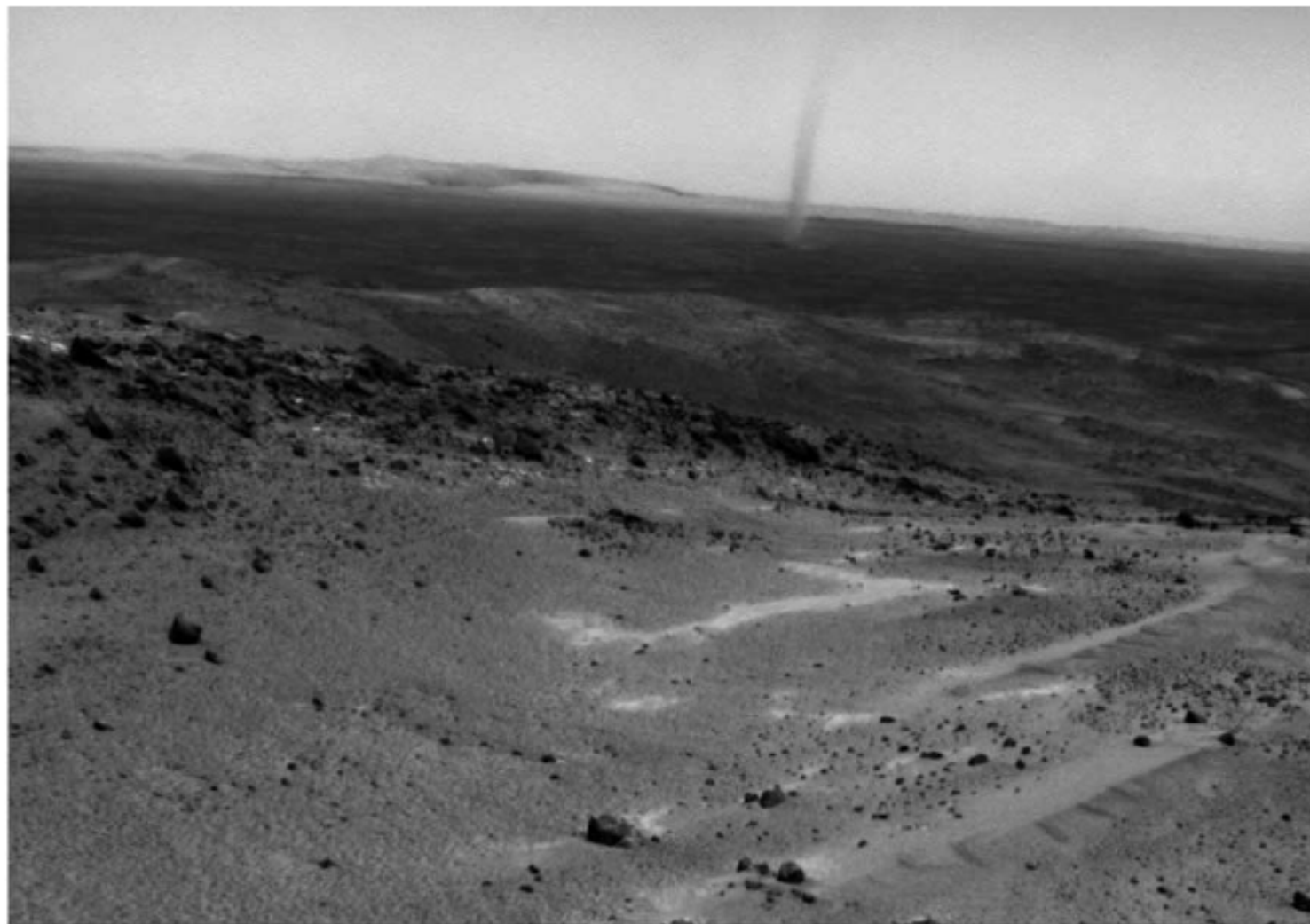


Figure 2. Dust devil on the floor of Gusev crater, imaged on sol 616 by the Spirit Navcam (image 2N181053592EFFAEOTP0607L0M1) from the Columbia Hills. This dust devil is about 1 km from the rover and is estimated to be at least 95 m high. The image was enhanced to increase contrast.

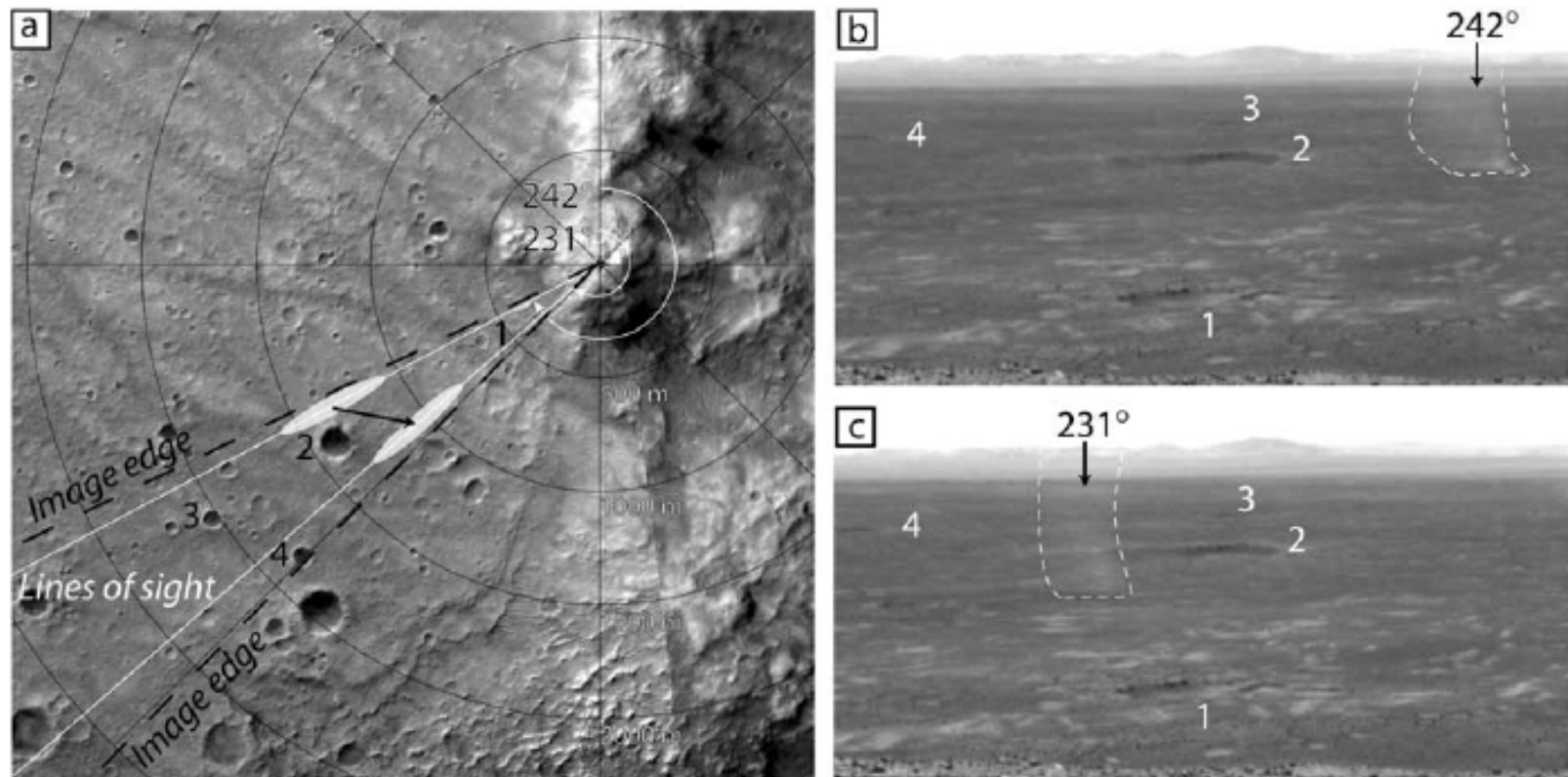


Figure 4. Illustration of the method used to estimate the location of dust devils, based on matching surface features seen from orbit with those seen from the rover and their azimuths from the rover (Figures 3b and 3c). The white ellipses indicate the uncertainty in location; the black arrow indicates the estimated travel distance and direction from which wind speed was estimated, using the framing rate between sequential images. (b) Image 2N177056615ESFADAEP1560L0M1 and (c) image 2N177056656ESFADAEP1560L0M1 are two frames showing the same dust devil. The white numbers in Figures 4b and 4c correspond to the black numbers in Figure 4a. This dust devil was observed on sol 571 and traveled 300 m in 41 seconds in an ESE direction between Figures 4b and 4c.

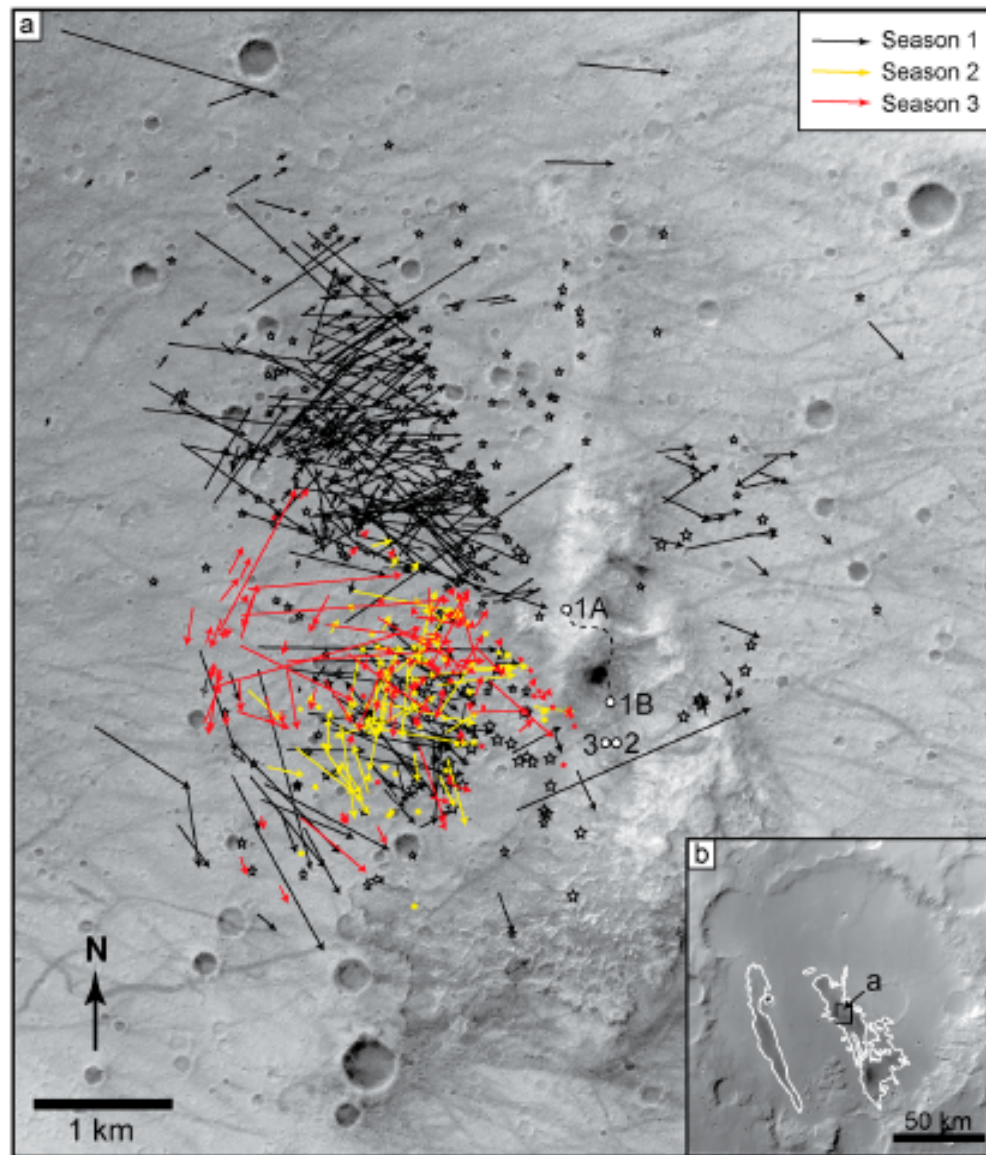
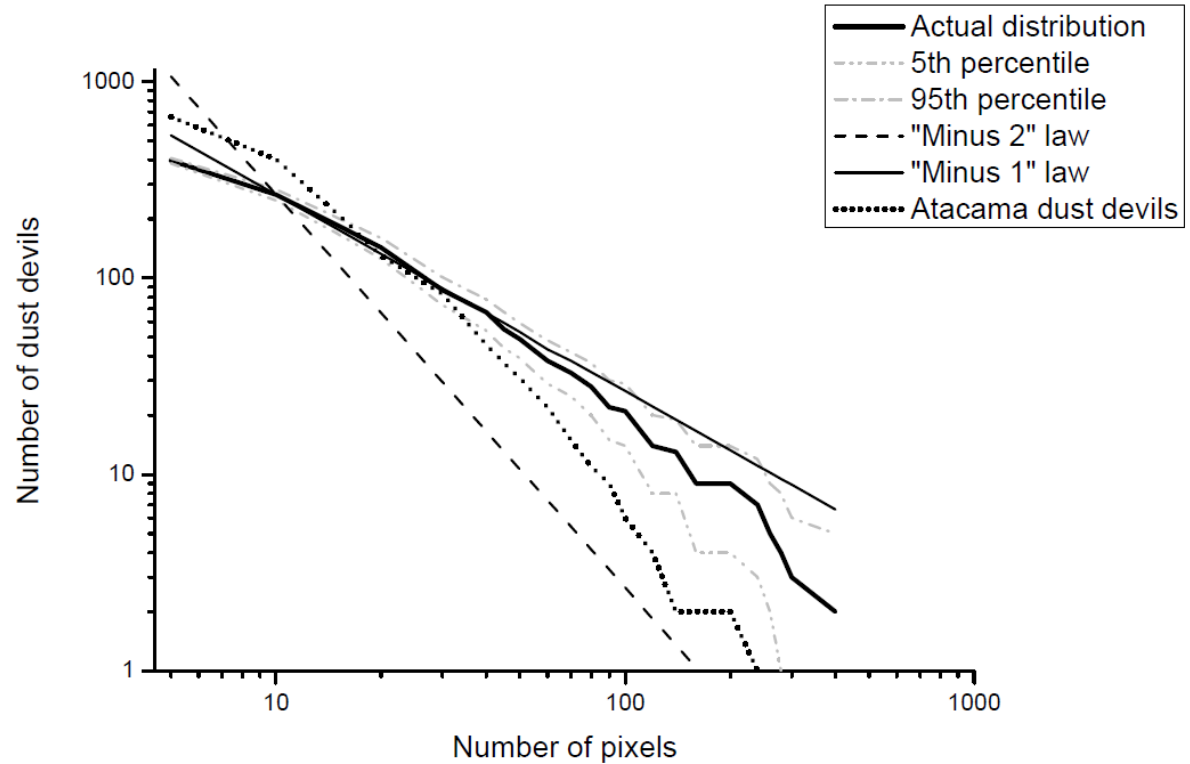
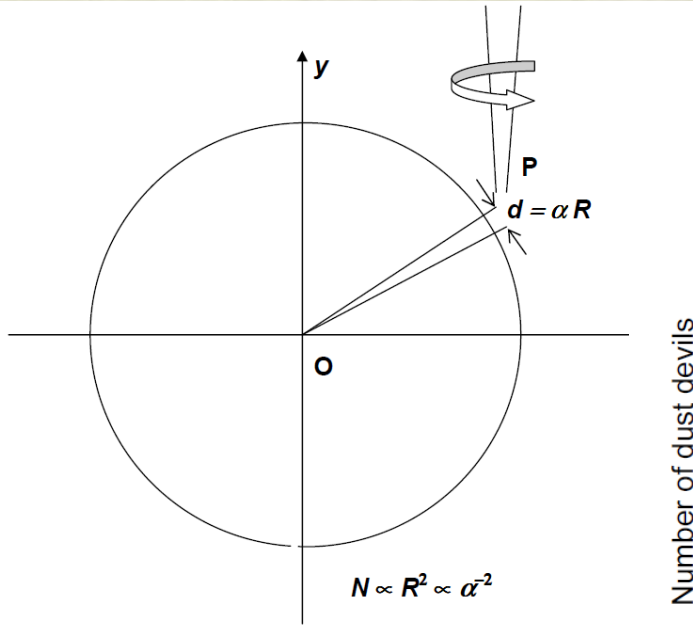


Figure 2. (a) Mosaic of HiRISE images of the operation area of Spirit; vectors are dust devil paths tracked in sequential images for each season (patterns reflect viewing geometry); stars are the location of active dust devils observed on single frames; 1A and 1B show the location of Spirit for season one; 2 and 3 show the rover location for seasons two and three. (b) MOC W/A image R21-00168 inset of Gusev Crater showing the Gusev Low Albedo Zone (GLAZ, outlined) and the location of Figure 2a.

Dust devil statistics (IV)



The number N of Spirit dust devils ("Mars Exploration Rover (MER) Spirit") with apparent size/thickness (in pixels) greater than a given pixel number n versus n (based on Greeley et al. (2006, 2010)). Reference "minus 2" and "minus 1" distributions are plotted, too. A dotted line shows the analogous results for the Atacama Desert dust devils [after Kurgansky, 2012].

Оптические наблюдения за пыльными вихрями (I)

Разрешающая способность
оптического прибора

$$\alpha_{\min}$$

Максимальная дистанция
на которой виден вихрь
размера D

$$D/f(\alpha_{\min})$$

Идеальные наблюдения

$$f(\alpha_{\min}) = \alpha_{\min}$$

Реальная ситуация

$$f(\alpha_{\min}) \propto \alpha_{\min}^s \quad 1/2 \leq s \leq 1$$

$$N_{obs}(\geq \alpha) = \pi f^{-2}(\alpha) TN \int_0^{\infty} D^2 p(D) \tau^{-1}(D) dD \quad \alpha \geq \alpha_{\min}$$

Lorenz (2013)

$$\tau(D) = 40D^{2/3}$$

$$f^{-2}(\alpha) = \alpha_0^{-2/3} \alpha^{-4/3} \quad \alpha_0 = 100$$

Оптические наблюдения за пыльными вихрями (II)

Пыльные вихри,
наблюдаемые
«марсоходом»
Spirit
(Greeley et al. 2006)

$$N_{obs}(\geq \alpha) = \beta \pi \alpha_0^{-2/3} \alpha^{-4/3} (1/40) TN \int_0^{\infty} D^2 p(D) D^{-2/3} dD$$

$$\beta = 0.13$$

$$\bar{D} = 30 \text{ м}$$

$$p(D) = \bar{D}^{-1} \exp(-D/\bar{D})$$

$$NT \approx 5990 \text{ km}^{-2} \text{ sec}$$

$$T = 37109 \text{ sec}$$

$$N_{obs}(\geq \alpha_{\min}) = 452$$

$$N \sim 0.16 \text{ km}^{-2}$$

$$g = 3.7 \text{ m sec}^{-2}$$

$$\rho = 1.5 \cdot 10^{-2} \text{ kg m}^{-3}$$

$$-L \sim \bar{D}/2 \approx 15 \text{ м}$$

$$Q \sim 5 \cdot 10^{-4} \text{ kg km}^{-2} \text{ sec}^{-1}$$

$$T = 10^4 \text{ sec}$$

$$M \sim 5 \text{ kg km}^{-2}$$

Greeley et al. (2006):

$$M \sim 19 \text{ kg km}^{-2}$$

Инструментальные измерения (I)

Преобразование Абеля

$$n = LN\bar{D}$$

$$w(l) = \frac{l}{\bar{D}} \int_l^\infty p(D) \frac{dD}{\sqrt{D^2 - l^2}}$$

$$p(D) = -\frac{2D\bar{D}}{\pi} \int_D^\infty \frac{d}{dl} \left[\frac{w(l)}{l} \right] \frac{dl}{\sqrt{l^2 - D^2}}$$

$$w(x) \equiv p(x)$$

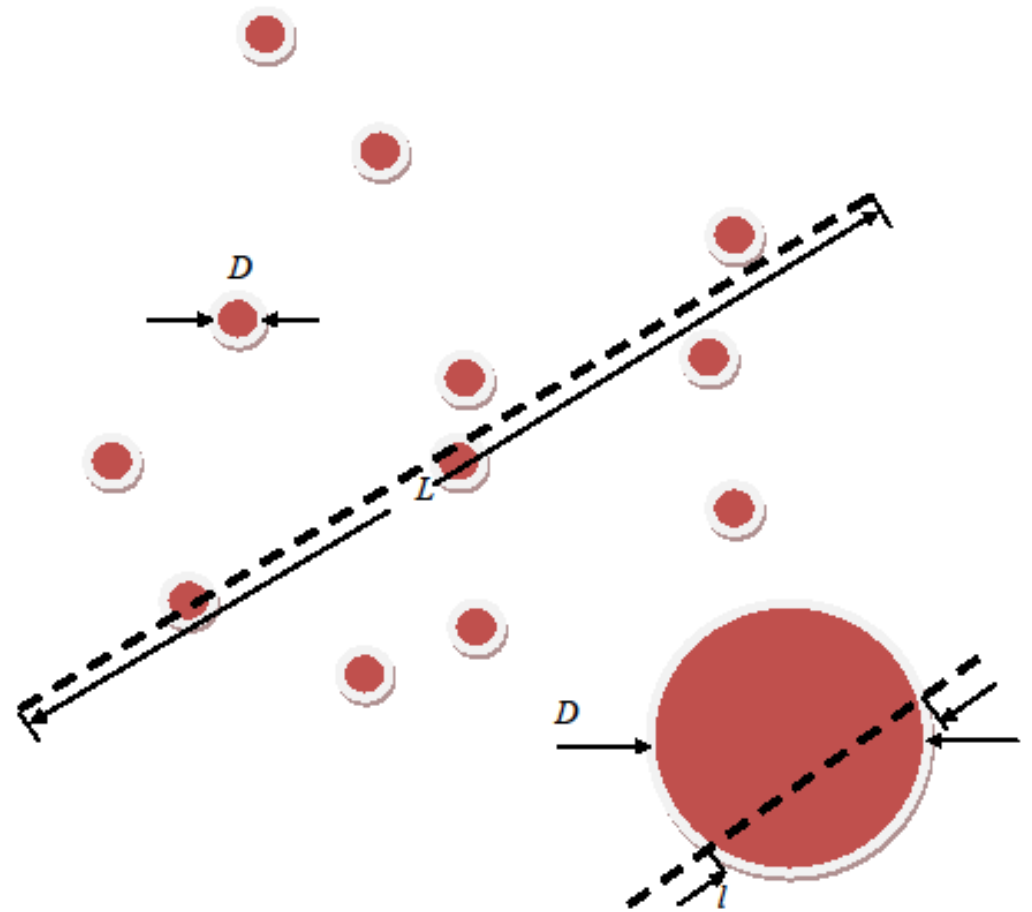
$$p(l) = \frac{l}{\bar{D}} \int_l^\infty p(D) \frac{dD}{\sqrt{D^2 - l^2}}$$

$$p(D) = \left(\pi D / 2\bar{D}^2 \right) \exp\left(-\pi D^2 / 4\bar{D}^2 \right)$$

Вульфсон (1961)

$$p(D) = (1/\bar{D}) \exp(-D/\bar{D})$$

$$w(l) = (l/\bar{D}^2) K_0(l/\bar{D})$$



Инструментальные измерения (II)

$$n = mUTN\bar{D} \quad m \gg 1$$

$$\bar{D} \sim -2L = 2u_*^3 / \kappa B$$

Пример: пыльные вихри в пустыне Мохаве (Ryan & Carroll, 1970)

$$\bar{D} = 1.7 \text{ m} \quad U \sim 3 \text{ msec}^{-1}$$

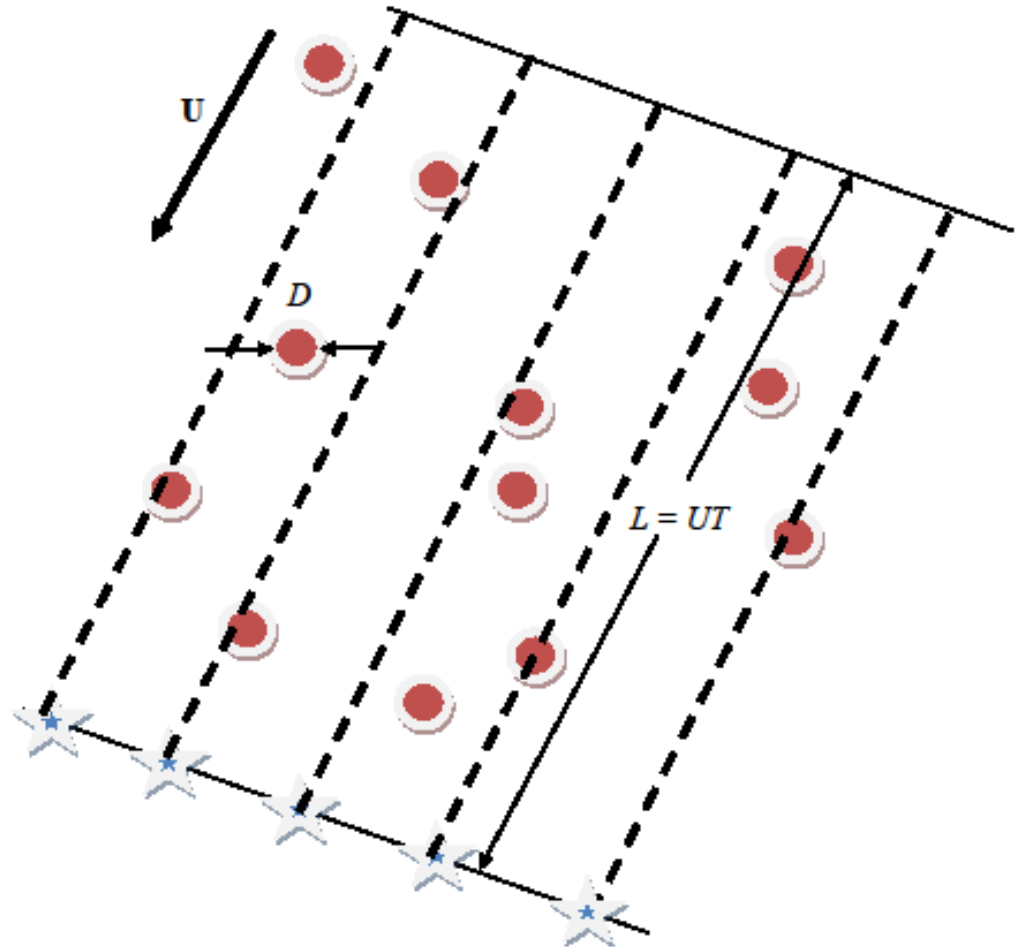
$$m = 1 \quad n = 80$$

$$T = 30 \times 5 \times 3600 \text{ sec}$$

$$N \sim 30 \text{ km}^{-2}$$

$$-L \sim 1 \text{ m} \quad u_* \approx 0.19 \text{ msec}^{-1}$$

$$M \sim 230 \text{ kg km}^{-2}$$



Заключительные замечания

Предложена модель, которая объясняет функциональную зависимость плотности вертикального потока массы песка (пыли) Q в конвективном пограничном слое атмосферы от плотности числа конвективных элементов (включая вихри) N , скорости трения u_* и вертикального (турбулентного) потока плавучести V . Показано, что поток Q пропорционален произведению корня квадратного из V на шестую степень u_* . Этот результат не противоречит приведенным в литературе эмпирически найденным зависимостям $Q(u_*)$.

Обсуждены два прямых метода экспериментального определения плотности N , когда вертикальный вынос пыли в основном определяется (земными и марсианскими) пыльными вихрями.

REFERENCES (A):

1. Bagnold R.A. The physics of blown sand and desert dunes. Methuen & CO. LTD, London, 1941, 265 p.
2. Дюнин А.К. Механика метелей. Изд-во Сибирского отделения АН СССР, Новосибирск, 1963, 379 с.
3. Greeley R., Iversen J.D. Wind as a geological process on Earth, Mars, Venus and Titan. 1985: Cambridge: Cambridge University Press, 333 p.
4. Алоян А.Е. Моделирование динамики и кинетики газовых примесей и аэрозолей в атмосфере. Наука, Москва, 2008, 416 с.
5. Семенов О.Е. Введение в экспериментальную метеорологию и климатологию песчаных бурь. Алматы, 2011, 580 с.
6. Klose M., Shao Y. Stochastic parameterization of dust emission and application to convective atmospheric conditions // Atmos. Chem. Phys., 2012, V.12, P. 7309-7320.
7. Курганский М.В. Распределение по размеру пыльных вихрей в атмосфере // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2006, Т. 42, № 3, 347-354.
8. Kurgansky M.V. Steady-state properties and statistical distribution of atmospheric dust devils // Geophys. Res. Lett., 2006, V. 33, L19S06.
9. Sinclair P.C. A quantitative analysis of the dust devil. 1966. Ph.D. dissertation. The University of Arizona, 292 pp.
10. Sinclair P.C. General characteristics of dust devils // J. Appl. Meteor., 1969, V. 8, P. 32-45

REFERENCES (B):

11. Rennó N.O., Burkett M.L., Larkin M.P. A simple thermodynamical theory for dust devils // *J. Atmos. Sci.*, 1998, V. 55, P. 3244-3252.
12. Вульфсон Н.И. Исследование конвективных движений в свободной атмосфере. Изд-во АН, Москва, 1961, 252 с.
13. Gillette D., Passi P. Modelling dust emission caused by wind erosion // *J. Geophys. Res.* 1988, V. 93, No. D11, P. 14233-14242.
14. Зубов Н.Н. Льды Арктики. Изд. Главсевморпути, М.-Л., 1945, 360 с.
15. Тернер Дж. Эффекты плавучести в жидкостях. Мир, М., 1977, 431 с.
16. Зилитинкевич С.С. Теоретическая модель проникающей турбулентной конвекции // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана*, 1987, Т. 23, С. 593-610.
17. Kurgansky M.V. Statistical distribution of atmospheric dust devils // *Icarus*, 2012, V. 219, P. 556-560.
18. Kurgansky M.V., Montecinos A., Villagran V., Metzger S.M. Micrometeorological conditions for dust-devil occurrence in the Atacama Desert // *Boundary-Layer Meteorol.*, 2011, V. 138, P. 285-298.
19. Greeley R., Whelley P.L., Arvidson R.E., Cabrol N.A., Foley D.J., Franklin B.J., Geissler P.G., Golombek M.P., Kuzmin R.O., Landis G.A., Lemmon M.T., Neakrase L.D.V., Squyres S.W., Thompson S.D. Active dust devils in Gusev crater, Mars: Observations from the Mars Exploration Rover Spirit // *J. Geophys. Res.* 2006, V. 111, E12S09.

REFERENCES (C):

20. Greeley R., Waller D.A., Cabrol N.A., Landis G.A., Lemmon M.T., Neakrase L.D.V., Hoffer M.P., Thompson S.D., Whelley P.L. Gusev Crater, Mars: Observations of three dust devil seasons // J. Geophys. Res., 2010, V. 115, E00F02.
21. Lorenz R.D. The longevity and aspect ratio of dust devils: Effects on detection efficiencies and comparison of landed and orbital imaging at Mars // Icarus, 2013, V. 226, P. 964-970.
22. Petrosyan A., Galperin B., Larsen S. E., Lewis S. R., Määttänen, A., Read P. L., Renno N., Rogberg L. P. H. T., Savijärvi H., Siili T., Spiga A., Toigo A., Vázquez L. The Martian atmospheric boundary layer. Reviews of Geophysics // 2011, V. 49, RG3005 (1-46).
23. Lorenz R.D. Power law distribution of pressure drops in dust devils: Observation techniques and Earth–Mars comparison // Planetary and Space Science, 2012, V. 60, P. 370–375.
24. Ryan J.A., Carroll J.J. Dust devil wind velocities: mature stage // J. Geophys. Res., 1970, V. 75, P. 531-541.
25. Carroll J.J., Ryan J.A. Atmospheric vorticity and dust devil rotation // J. Geophys. Res., 1970, V. 75, P. 5179-5184.
26. Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблица интегралов, рядов и произведений. 7-е издание. Под ред. А. Джеффри, Д. Цвиллингера. БХВ-Петербург, СПб., 2011, 1232 с.

REFERENCES (D):

27. Pathare A.V., Balme M.R., Metzger S.M., Spiga A., Towner M.C., Renno N.O., Saca F. Assessing the power law hypothesis for the size-frequency distribution of terrestrial and martian dust devils // *Icarus*, 2010, V. 209, P. 851-853.

Курганский М.В. О вертикальном выносе пыли в конвективно-неустойчивом пограничном слое атмосферы // Известия РАН. Физика атмосферы и океана (в печати).

Работа выполнена в рамках программы №22 фундаментальных исследований Президиума РАН «Фундаментальные проблемы исследований и освоения Солнечной системы», а также поддержана РФФИ, проект № 13-05-01025-а.

Спасибо!