

УДК 523.43-852;531.001.362

К ВОПРОСУ О РАСЧЕТЕ ПАРАМЕТРОВ ВИХРЕЙ В ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ АТМОСФЕРЕ МАРСА

© 2019 г. Ю. Н. Извекова^{a, b, *}, С. И. Попель^{a, b}, О. Я. Извеков^b

^aИнститут космических исследований РАН, Москва, Россия

^bМосковский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

*e-mail: besedina_yn@mail.ru

Поступила в редакцию 25.12.2018 г.

После доработки 26.02.2019 г.

Принята к публикации 26.03.2019 г.

Работа посвящена изучению пылевых вихрей на Земле и на Марсе. Рассматривается гидродинамическое подобие конвективных вихрей, определяются критерии подобия. Моделируется движение пылевых частиц в вихре. Определяются условия подобия траекторий пылевых частиц при движении в вихре в земной атмосфере и в марсианской атмосфере. Показано, что существует подобие между земными и марсианскими вихрями. Этот факт может быть полезен для исследования марсианской атмосферы, учитывая, что на Земле существуют отработанные методики измерения параметров вихрей, в то время как подобные измерения на Марсе затруднены.

Ключевые слова: конвективные вихри, теория подобия, пылевые частицы, динамика пыли в вихрях

DOI: 10.1134/S0320930X19050050

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время проводятся активные исследования Красной планеты. Поверхность Марса и околоповерхностный слой изучаются с помощью марсоходов Mars Exploration Rover Opportunity и Mars Science Laboratory Curiosity, в конце 2018 г. совершил успешную посадку на Марс космический зонд InSight. Атмосфера Марса зондируется с помощью орбитальных модулей нескольких миссий, в том числе российской-европейской миссии ExoMars. Постоянно поступающие данные о состоянии атмосферы Марса позволяют строить модели глобальной циркуляции атмосферы (Forget и др., 1999; Vougher и др., 2015), изучать сезонную вариативность и распределение составляющих атмосферы по высотам (González-Galindo и др., 2005; Forget и др., 2009; Nèmes и др., 2011).

Несмотря на то, что атмосфера Марса разрежена, в разное время на разных высотах в ней наблюдаются взвешенные частицы поднятой с поверхности пыли или сконденсированных углекислого газа и воды (Montmessin и др., 2006; 2007; Fedorova и др., 2014). В последние десятилетия существенное внимание уделяется исследованиям параметров пыли и пылевой плазмы в космосе (Popel, Gisko, 2006; Popel и др., 2011), в атмосферах и экзосферах планет (Michael и др., 2008; Fedorova и др., 2014; Извекова, Попель, 2017) и спутников (Stubbs и др., 2006; 2007; Sternovsky и др.,

2008; Popel и др., 2013; 2017; 2018), что обусловлено существенной ролью пыли в условиях разреженной атмосферы или ее отсутствия. Тогда как в земной атмосфере перераспределение пылевых частиц имеет важное экологическое значение, в разреженных атмосферах пылевая компонента может быть определяющей в формировании климата. В случае зарядки пылевых частиц и образования плазменно-пылевой системы поведение пылевых частиц существенным образом меняется, что необходимо учитывать при планировании космических миссий.

Целью настоящей работы является описание конвективных вихрей на Марсе с использованием данных, полученных при наблюдениях в условиях земной атмосферы. В атмосферах планет важную роль играют конвективные процессы, возникающие в результате наличия вертикальных градиентов температуры. Роль конвекции существенна, в частности, при образовании облаков, причем не только в земной атмосфере, но и на других планетах. Так, в марсианской атмосфере наблюдались облака углекислого газа, предположительно конвективного происхождения. (Montmessin и др., 2007). Кроме того, конвекция считается основной причиной возникновения пылевых вихрей на Земле и на Марсе. На Земле пылевые вихри, как правило, имеют размеры порядка нескольких метров, редко возникают крупные вихри до 100 метров в диаметре, в то время

как в марсианской атмосфере наблюдаются вихри, составляющие сотни метров и даже километры в диаметре. Пылевые вихри на Марсе привлекли внимание ученых еще в середине прошлого века, даже ранее, чем были получены первые визуальные подтверждения их существования после обработки данных миссии Викинг в 1980-х годах, по настоящее время это явление активно исследуется (Balme, Greeley, 2006; Delory и др., 2006; Onishchenko и др., 2014; 2016; Barth и др., 2016), однако окончательной общепринятой модели на данный момент не построено. Проводилось лабораторное моделирование ударов метеоритов на Марсе с использованием теории подобия (Rybakov и др., 1997), в результате было получено, что удары метеоритов могут способствовать образованию конвективных пылевых вихрей. Пылевые вихри способны поднимать и переносить большое количество пыли с поверхности, что особенно важно в разреженной атмосфере Марса.

Отметим, что теория подобия является важным инструментом исследования процессов в атмосферах планет. Развита, в частности, теория подобия для циркуляции планетных атмосфер (Golitsyn, 1970; Голицын, 2004). В настоящей работе предпринимается попытка рассмотрения гидродинамического подобия конвективных приповерхностных вихрей.

Статья имеет следующую структуру. В следующем разделе данной работы приводится обзор параметров марсианской атмосферы, раздел “Подобие конвективных структур” посвящен применению теории подобия для описания марсианских вихрей, в разделе “Моделирование вихрей на Марсе и на Земле” описываются результаты численного моделирования вихревых структур, в последнем разделе приводятся выводы.

ПАРАМЕТРЫ АТМОСФЕРЫ МАРСА

Атмосфера Марса имеет некоторую схожесть с земной атмосферой. Плотность и давление на поверхности составляют примерно сотую часть земных, основной газовой компонентой атмосферы (95%) является углекислый газ. Распределение температуры таково, что можно выделить область тропосферы – от поверхности до высоты 50–60 км, средней атмосферы – от тропосферы до 110 км и термосферы – выше 110 км (González-Galindo и др., 2005). Средняя температура поверхности составляет 210 К, профиль температуры испытывает значительные суточно-сезонные изменения, особенно в области тропосферы. На Марсе присутствует ионосфера с концентрациями электронов, достигающими максимальных значений 10^5 см^{-3} на высотах 135–140 км, нижняя граница ионосферы обычно начинается от 80 км, но в некоторых случаях может опускаться до 65 км (Pätzold и др., 2005). Кроме того, проводимость газо-

вой оболочки Марса вблизи его поверхности весьма высока (превышает проводимость воздуха у поверхности Земли почти на два порядка) и по разным оценкам составляет от $2.8 \times 10^{-12} \text{ См/м}$ (Zhai и др., 2006) до 10^{-11} См/м (Michael и др., 2008). Концентрации электронов и ионов у поверхности планеты днем достигают значений до порядка 1 см^{-3} для электронов и 10^3 см^{-3} для ионов (Michael и др., 2008).

На высотах до 50–70 км важным параметром атмосферы является распределение взвешенных пылевых частиц, которое сильно меняется во времени и пространстве. Пылевая компонента играет существенную роль в динамике атмосферы Марса, в радиационном балансе, особенно во время пылевых бурь, когда концентрация взвешенных пылевых частиц резко возрастает. Но и в спокойный период атмосферная пыль на Марсе оставляет ряд вопросов, таких как причины появления пылевых облаков на различных высотах от 4 до 80–100 км (Montmessin и др., 2006) и источники пылевых частиц мелкой моды со средним диаметром около 44 нм, длительное время наблюдавшихся на высотах 30–40 км в северном и до высот 70 км в южном полушарии (Fedorova и др., 2014). Возможным источником пылевых частиц являются пылевые вихри (dust devils), которые регулярно наблюдаются на поверхности Марса наряду с пылевыми бурями. Сильная электризация в этих вихрях дает основание полагать, что в некоторых случаях возможно возникновение пробоев (Zhai и др., 2006; Renno и др., 2003). Основные параметры пылевых вихрей на Земле, такие как размеры, вертикальные и горизонтальные скорости, электрические поля (Farrell и др., 1999; Jackson, Farrell, 2006), измеряются в экспериментах на территории пустынь, где эти вихри часто возникают. На Земле такие вихри обычно имеют размеры от нескольких метров до километра в высоту и менее 100 м в диаметре (Mattsson и др., 1993). В табл. 1 приведены некоторые такие данные, измеренные в разное время в вихрях на высоте 2 м (3.5 м для (Tratt и др., 2003)) над поверхностью Земли.

ПОДОБИЕ КОНВЕКТИВНЫХ СТРУКТУР

Выясним, являются ли пылевые вихри на Земле и на Марсе подобными. Обсудим для этого сначала основные аспекты теории подобия. Пусть некая физическая величина a является функцией n других физических величин и размерных параметров a_1, a_2, \dots, a_n

$$a = f(a_1, a_2, \dots, a_n). \quad (1)$$

В теории размерности (см., например, Седов, 1977; Баренблатт, 1982) доказывается следующее утверждение (пи-теорема).

Таблица 1. Результаты измерений скорости воздуха в пылевых вихрях на Земле. Тангенциальная компонента скорости – это скорость вращения воздуха относительно центра вихря. Приводятся средние значения скоростей

Источник	Количество вихрей	Тангенциальная компонента скорости, м/с	Горизонтальная компонента скорости, м/с	Вертикальная компонента скорости, м/с
Sinclair (1964)	4		9.3	
Ryan, Carroll (1970)	80	4.2		0.7
Fitzjarrald (1973)	11	7.3		1.3
Sinclair (1973)	3	10.8		13.3
Metzger (1999)	5	13.6		5.2
Balme и др. (2003)	10		17.0	
Tratt и др. (2003)	3		8.8	3.3

Пусть k величин из a_1, a_2, \dots, a_n имеют независимую размерность, тогда зависимость (1) можно представить в следующем виде

$$P_a = f(P_1, P_2, \dots, P_{n-k}), \quad (2)$$

где P_a – безразмерная искомая величина, P_1, P_2, \dots, P_{n-k} – безразмерные комплексы.

Явления называются подобными, если физические параметры отличаются по величине, но безразмерные комплексы P_1, P_2, \dots, P_{n-k} совпадают. Очевидно также, что физическая суть явлений при этом должна быть одинакова. Подобные явления широко используются при планировании лабораторных экспериментов.

Главную роль в формировании пылевых вихрей на Марсе и Земле играет термическая конвекция. Оценим, каковы параметры (характерный масштаб и скорость течения газа) вихря на Марсе, который подобен типичному вихрю на Земле.

Запишем систему уравнений конвективного движения вязкого газа в поле тяжести. При достаточно медленных течениях газ можно считать несжимаемым, при этом существенен эффект расширения газа при нагреве. Представим поля температур T , плотности ρ и давления p в виде суммы равновесных величин (с индексом “0”) и их возмущений (со штрихом):

$$T = T_0 + T', \quad \rho = \rho_0 + \rho', \quad p = p_0 + p'.$$

Величины T_0, ρ_0 имеют постоянные значения, величина p_0 соответствует механическому равновесию при постоянных T_0, ρ_0 :

$$p_0 = -\rho_0 g z.$$

Возмущение плотности пропорционально возмущению температуры.

$$\rho' = \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p T' = -\rho_0 \beta T',$$

где β – коэффициент теплового расширения газа.

Уравнение непрерывности для несжимаемого газа имеет вид

$$\operatorname{div} \mathbf{v} = 0. \quad (3)$$

Уравнение движения представляет собой следствие из уравнения Навье-Стокса:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v} = -\frac{\nabla p'}{\rho_0} - \mathbf{g} \beta T' + \nu \Delta \mathbf{v}, \quad (4)$$

где ν – кинематическая вязкость.

Следствие закона сохранения энергии – уравнение теплопроводности несжимаемого вязкого газа

$$\frac{\partial T'}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) T' = \chi \Delta T' + \frac{2\nu}{c_p} J, \quad (5)$$

где Δ – оператор Лапласа, χ – коэффициент температуропроводности, c_p – теплоемкость газа при

постоянном давлении, $J = D_{ij} D_{ij}$, $D_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right)$.

Согласно сформулированным уравнениям (3)–(5), скорость течения газа является функцией следующих параметров: $\mathbf{x}, t, l, \tau, \Delta T, \chi, \beta, \nu, \rho_0, T_0, \mathbf{g}$, где l, τ – характерные масштабы длины и времени, ΔT – максимальная разность температур. В условиях термической конвекции число Пекле $\nu l / \chi$, либо число Рейнольдса $\nu l / \nu$ могут являться безразмерной формой искомой переменной, в данном случае скорости, а критерием подобия является комбинация критерия Грасгофа Gr и критерия Прандтля Pr (Гухман, 1973). Критерий (число) Грасгофа является мерой соотношения архимедовой выталкивающей силы, вызванной неравномерным распределением плотности газа в неоднородном поле температур, и силами вязкости:

$$Gr = \frac{g l^3 \beta \Delta T}{\nu^2}.$$

Критерий (число) Прандтля $Pr = \nu / \chi$, характеризует соотношение между интенсивностями мо-

лекулярного переноса количества движения и переноса теплоты теплопроводностью; является физической характеристикой среды и зависит только от ее термодинамического состояния. Для газов почти не зависит от температуры, для двухатомных газов порядка 0.72, для многоатомных от 0.75 до 1. Для газов можно считать $\chi \propto T^{3/2}/(p\sqrt{m})$, где T – температура, p – давление, m – молярная масса газа. По сути, в таком случае число Прандтля становится равным единице, $\text{Pr} = 1$.

В результате соотношение для безразмерной скорости \tilde{v} в стационарном случае принимает вид:

$$\tilde{v} = f\left(\frac{\mathbf{x}}{l}, \text{Gr}, \text{Pr}\right). \quad (6)$$

Поскольку развитый пылевой вихрь можно отнести к ситуации, когда инерционная сила имеет большое относительное значение по сравнению с эффектами вязкости, примем безразмерную скорость в виде $\tilde{v} = \mathbf{v}l/\chi$, а в качестве критерия подобия будем использовать величину GrPr^2 , а не Gr и Pr по отдельности. Стоит отметить, что в случае главенствующей роли вязкости используется критерий GrPr (Гухман, 1973). В нашем случае (6) примет вид:

$$\mathbf{v} = \frac{\chi}{l} f\left(\frac{\mathbf{x}}{l}, \text{GrPr}^2\right). \quad (7)$$

Обозначим индексом “ E ” параметры земной атмосферы, а индексом “ M ” – марсианской. Используя (7), найдем отношение критериев подобия для земного и марсианского вихрей:

$$\frac{(\text{GrPr}^2)_E}{(\text{GrPr}^2)_M} = \frac{g_E l_E^3 \beta_E \Delta T_E T_M^3 P_E^2 m_E}{g_M l_M^3 \beta_M \Delta T_M T_E^3 P_M^2 m_M}. \quad (8)$$

Будем использовать следующие соотношения параметров:

$$\frac{g_E}{g_M} = 2.65, \quad \frac{\beta_E}{\beta_M} \approx 1, \quad \frac{T_M^3}{T_E^3} \approx \left(\frac{200}{300}\right)^3 \approx 0.3,$$

$$\frac{P_E^2}{P_M^2} \approx 10000, \quad \frac{m_E}{m_M} = \frac{29}{44} \approx 0.66.$$

Согласно измерениям космического аппарата Viking (Balme, Greeley, 2006), максимальное изменение температуры в марсианских вихрях составляет 5–6°C, что соответствует земным вихрям. Тогда $\Delta T_E/\Delta T_M \approx 1$.

Полагая для подобных вихрей, что

$$\frac{(\text{GrPr}^2)_E}{(\text{GrPr}^2)_M} = 1,$$

и учитывая (8), получаем соотношение между характерными масштабами:

$$l_M \approx 17l_E. \quad (9)$$

Далее из равенства безразмерных скоростей для Земли и Марса

$$\frac{\mathbf{v}_E l_E}{\chi_E} = \frac{\mathbf{v}_M l_M}{\chi_M},$$

получаем соотношение характерных скоростей

$$v_M \approx 2.6v_E. \quad (10)$$

Полученные значения не противоречат имеющимся данным. Так, вертикальные скорости в земных вихрях имеют значения порядка 10 м/с, а скорости в марсианских вихрях согласно оценкам, проведенным на основе измерений посадочных аппаратов Viking-1 и Viking-2 (Ryan, Lucich, 1983), в несколько раз больше.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИХРЕЙ НА МАРСЕ И НА ЗЕМЛЕ

Уравнения гидродинамики (3)–(5), описывающие конвективные движения, можно преобразовать таким образом, чтобы с их помощью описывать трехмерные вихревые структуры (Onishchenko и др., 2014; 2016; Извекова, Попель, 2017; 2018). Основные уравнения, описывающие динамику газа в пылевых вихрях, перепишем в виде:

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

$$= -r \frac{d \xi}{dr} + \frac{r}{\rho_0^2} J \{ \rho', p' \}, \quad (11)$$

$$r \frac{\partial \xi}{\partial t} - N^2 \frac{\partial \Psi}{\partial r} + J \{ \Psi, \xi \} = 0, \quad (12)$$

$$\frac{\partial \omega_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial \omega_z}{\partial r} = \omega_z \frac{\partial v_z}{\partial z}, \quad (13)$$

где $\tilde{\Delta} = r \frac{\partial}{\partial r} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ – оператор Грэда-Шафранова, Ψ – функция тока полоидального движения, $\xi = g \rho' / \rho_0$ – нормированное возмущение

плотности; $N = g^{1/2} \left(\frac{1}{\gamma p} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} \right)^{1/2}$ – частота

Вяйсяля-Брента, γ – показатель адиабаты, $J \{ a, b \} = \frac{\partial a}{\partial x} \frac{\partial b}{\partial y} - \frac{\partial a}{\partial y} \frac{\partial b}{\partial x}$ – якобиан, возмущения плотности

и давления малы $|\rho'| \ll \rho_0$, $|p'| \ll p_0$; ω_z – тороидальная завихренность, полоидальные компоненты скорости v_r и v_z определяются функцией

$$\text{тока } v_r = -\frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial z}, \quad v_z = \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r}.$$

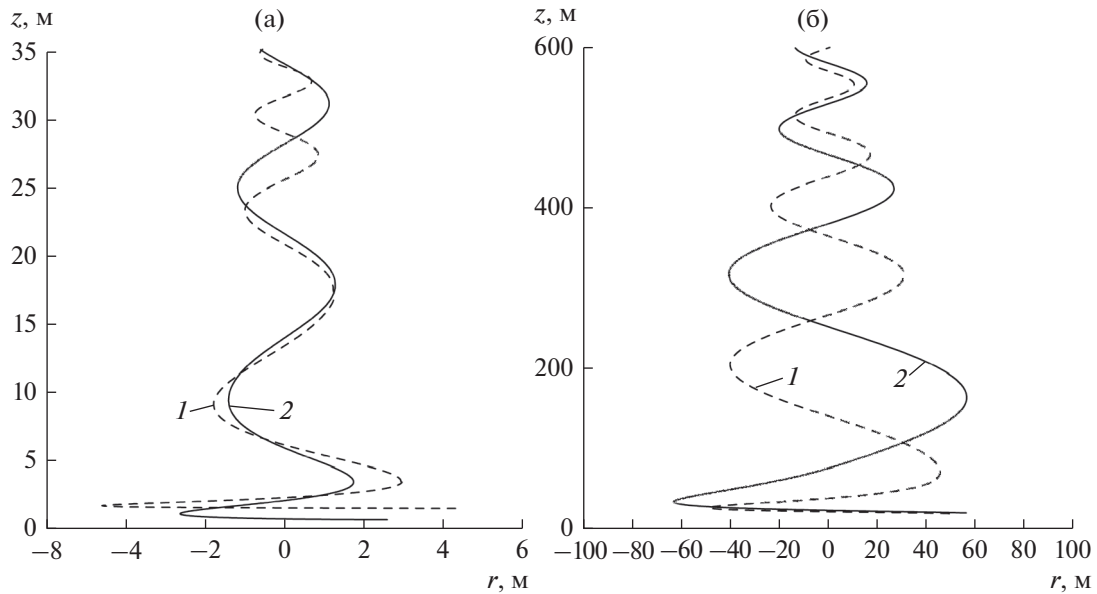


Рис. 1. Траектории пылевых частиц размером 1 мкм (кривая 1) и 10 мкм (кривая 2): (а) – на Земле в вихре размером 10 м и (б) – на Марсе в вихре размером 170 м.

Численное решение системы (11)–(13) позволяет определить поле скоростей вихря. Важной компонентой пылевого вихря являются поднятые с поверхности пылевые частицы. В рамках подхода, используемого в данной работе, пылевые частицы рассматриваются как примесь, не оказывающая значительного влияния на гидродинамические параметры вихря. Стоит отметить, что учет влияния пылевой компоненты на газовый поток проводился ранее в контексте исследования марсианской атмосферы при изучении движения турбулентных потоков со взвешенными частицами во время пылевых бурь (Barenblatt, Golitsyn, 1974; Golitsyn 1973; Leovy и др., 1973; Gierasch, Goody, 1972). Пылевые бури представляют собой более продолжительные и более масштабные явления, чем пылевые вихри, и охватывают большую часть планеты. При движении в вихре в результате столкновений частицы приобретают электрический заряд, причем, как было замечено (Melnik, Parrot, 1998; Lacks, Levandovsky, 2007), при столкновении частиц одинакового материала на крупных аккумулируется положительный заряд, а на частицах меньшего размера – отрицательный. Разноименная зарядка частиц разного размера приводит к пространственному разделению заряда и генерации электрического поля. Так, в земных вихрях были измерены поля 4.35 кВ/м для вихря диаметром 7 м (Fargel и др., 2004), 20 кВ/м для вихря диаметром 30 м (Delogu и др., 2006). Ввиду более низкого значения пробойного поля на Марсе актуально исследование электрификации марсианских вихрей. Согласно современным моделям (Barth и др., 2016) значения электрического поля могут лежать вблизи пробойных. Одна-

ко на настоящий момент нет однозначного ответа на вопрос о молниевой активности в пылевых вихрях на Марсе. Данные наземных измерений с помощью радиотелескопа (Ruf и др., 2009) позволяют предположить возбуждение шумановского резонатора на Марсе во время пылевых бурь. Это может свидетельствовать о наличии разрядов во время измерений. Однако измерения с помощью орбитальных модулей (Yaig, 2012) не нашли подтверждения грозовой активности. Для однозначного ответа на этот вопрос необходимы измерения электрических полей на поверхности Марса, которые планируется проводить, в частности, в рамках второго этапа проекта ExoMars. Для построения полной модели пылевого вихря необходимо учитывать эффекты электризации. При моделировании движения пылевых частиц учитывается их электризация за счет столкновений (трибоэффект) и генерируемое электрическое поле (Извекова, Попель, 2017). Детальное рассмотрение электрических процессов с точки зрения теории подобия представляется довольно сложным. В данной статье мы остановимся на рассмотрении движения частицы без слагаемого, определяемого силой электрического взаимодействия, поскольку предыдущие расчеты (Извекова, Попель, 2017; 2018) показали, что на большей части траектории влиянием электрического поля можно пренебречь. Запишем уравнение движения пылевой частицы плотности ρ_p и размера a в поле скоростей вихря:

$$\frac{d\mathbf{V}_p}{dt} = \mathbf{g} + \frac{18\eta}{C_c \rho_p a^2} \mathbf{V}_{pr} \quad (14)$$

Здесь \mathbf{V}_p – скорость пылевой частицы, \mathbf{V}_{pr} – скорость частицы относительно вихря, η – динамическая вязкость $C_c = 1 + \text{Kn}(A + B \exp(-b/\text{Kn}))$ – поправка Каннингема (Алоян, 2002), где $A = 1.257$, $B = 0.4$, $b = 1.10$, $\text{Kn} = 2\lambda/a$ – число Кнудсена, λ – средняя длина свободного пробега молекул газа. Здесь учитывается, что при размерах частицы, сравнимых с длиной свободного пробега, необходимо учитывать поправку Каннингема. На Земле поправка будет незначительна, а на Марсе, где длина свободного пробега составляет около 5 мкм, ее необходимо учитывать. Обезразмерим уравнение (14) на характерные значения длины r_0 и скорости V_0 . В обезразмеренном виде имеем:

$$\frac{d\tilde{\mathbf{V}}_p}{dt} = \tilde{\mathbf{g}} + \frac{18\eta}{C_c \rho_p a^2 V_0} \tilde{\mathbf{V}}_{pr},$$

где $\tilde{\mathbf{V}}_p = \mathbf{V}_p/V_0$, $\tilde{\mathbf{V}}_{pr} = \mathbf{V}_{pr}/V_0$, $\tilde{\mathbf{g}} = \frac{r_0}{V_0^2} \mathbf{g}$.

Можно убедиться, что обезразмеренные значения ускорения свободного падения на Земле и на Марсе совпадают. Для подобия траекторий необходимо, чтобы коэффициенты перед относительными скоростями были равны:

$$\frac{\eta_E}{C_{cE} \rho_{pE} a_E^2 V_{0E}} = \frac{\eta_M}{C_{cM} \rho_{pM} a_M^2 V_{0M}}.$$

Используя соотношения между характерными размерами и скоростями (9)–(10) и предполагая, что плотности частиц совпадают, а вязкость марсианской атмосферы составляет 0.6 от земной (оценивается по вязкости углекислого газа при 210 К) (Бабичев и др., 1991), получим

$$a_M \approx a_E.$$

Построим вихрь с размерами ядра 10 м на Земле и 170 м на Марсе. Траектории движения пылевых частиц в этих вихрях приведены на рис. 1. Можно убедиться в качественном соответствии траекторий частиц с параметрами, подобранными согласно оценкам теории подобия.

ВЫВОДЫ

Таким образом, в работе рассмотрено подобие конвективных структур в атмосферах Земли и Марса. Получены критерии подобия. Проведены оценки характерных параметров вихрей и пылевых частиц, которые удовлетворяют критериям подобия. Получены соотношения между скоростями в вихре и размерами вихревых структур в атмосферах Земли и Марса, при которых выполняются условия подобия. Рассмотрено движение пылевых частиц в поле скоростей пылевых вихрей и приведены оценки размеров частиц, траектории которых можно считать подобными. Проведено моделирование вихревой структуры и по-

строены траектории пылевых частиц в вихре. Проведенные оценки и моделирование показали, что существует подобие пылевых вихрей на Земле и на Марсе. Учитывая, что измерения на Марсе затруднены, а на Земле доступны экспериментаторам, данные выводы могут быть полезны при исследовании марсианских вихрей.

Отметим, что приведенное рассмотрение базируется, в основном, на учете гидродинамических процессов. Такой подход типичен для физики атмосферы (см., например, Голицын, 2004). При этом следует учитывать возможность развития плазменных процессов в атмосферах планет, таких как генерация электрических полей и зарядка пылевых частиц (Извекова, Попель, 2017; Izvekova, Popel, 2016). Вместе с тем, из-за преобладающей роли нейтральной компоненты в приповерхностной атмосфере динамика вихрей в ней определяется гидродинамическими процессами. Данный факт и определяет возможность построения теории гидродинамического подобия конвективных приповерхностных вихрей.

Данная работа выполнена в рамках проекта РНФ № 18-72-00119.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алоян А.Е. Динамика и кинетика газовых примесей и аэрозолей в атмосфере. Курс лекций. М.: ИВМ РАН, 2002. 201 с.
- Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. и др. Физические величины: Справочник / Ред. Григорьев И.С., Мейлихов Е.З. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
- Баренблатт Г.И. Подобие, автомодельность, промежуточная асимптотика. Л.: Гидрометеоздат, 1982. 257 с.
- Голицын Г.С. Природные процессы и явления. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 344 с.
- Гухман А.А. Введение в теорию подобия. Учеб. пособие для вузов. М.: “Высшая школа”, 1973. 296 с.
- Извекова Ю.Н., Попель С.И. Плазменные эффекты в пылевых вихрях у поверхности Марса // Физика плазмы. 2017. Т. 43. №. 12. С. 1010–1017.
- Извекова Ю.Н., Попель С.И. Нелинейные волновые структуры и плазменно-пылевые эффекты в атмосфере Земли // Физика плазмы. 2018. Т. 44. № 9. С. 747–751.
- Попель С.И., Копнин С.И., Голубь А.П., Дольников Г.Г., Захаров А.В., Зеленый Л.М., Извекова Ю.Н. Пылевая плазма у поверхности Луны // Астрон. вестн. 2013. Т 47. № 6. С. 455–466. (Popel S.I., Kopnin S.I., Golub' A.P., Izvekova Y.N., Dol'nikov G.G., Zakharov A.V., Zelenyi L.M. Dusty plasma at the surface of the moon // Sol. Syst. Res. 2013. V. 47. № 6. P. 419–429.)
- Попель С.И., Голубь А.П., Захаров А.В., Зеленый Л.М. Пылевая плазма у поверхности Фобоса // Письма в ЖЭТФ. 2017. Т. 106. № 8. С. 469–475.

- Попель С.И., Голубь А.П., Зеленый Л.М.* Пылевая плазма в окрестностях спутника Марса – Деймоса // Физика плазмы. 2018. Т. 44. № 8. С. 635–641.
- Седов Л.И.* Методы подобия и размерности в механике. 8-е изд., перераб. М.: Наука, 1977. С. 440.
- Balme M., Metzger S., Towner M., Ringrose T., Greeley R., Iversen J.* Friction wind speeds in dust devils: A field study // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30. P. 161830.
- Balme M., Greeley R.* Dust devils on Earth and Mars // *Rev. Geophys.* 2006. V. 44. P. RG3003.
- Barenblatt G.I., Golitsyn G.S.* Local structure of mature dust storms // *J. Atmosph. Sci.* 1974. V. 31. № 7. P. 1917–1933.
- Barth E.L., Farrell W.M., Rafkin S.C.R.* Electric field generation in Martian dust devils // *Icarus.* 2016. V. 268. P. 253–265.
- Bougher S.W., Pawlowski D., Bell J.M., Nelli S., McDunn T., Murphy J.R., Chizek M., Ridley A.* Mars Global Ionosphere-Thermosphere Model (MGITM): Solar cycle, seasonal, and diurnal variations of the Mars upper atmosphere // *J. Geophys. Res. Planets.* 2015. V. 120. P. 311–342.
- Delory G.T., Farrell W.M., Atreya S.K., Renno N.O., Wong A.-S., Cummer S.A., Sentman D.D., Marshall J.R., Rafkin S.C.R., Catling D.C.* Oxidant enhancement in Martian dust devils and storms: Storm electric fields and electron dissociative attachment // *Astrobiology.* 2006. V. 6. № 3. P. 451–462.
- Dust devils. Space Sciences Series of ISSI. V. 59 / Eds Reiss D., Lorenz R., Balme M., Neakrase L., Rossi A.P., Spiga A., Zarnecki J. Springer Netherlands. 2017.
- Farrell W.M., Kaiser M.L., Desch M.D., Houser J.G., Cummer S.A., Wilt D.M., Landis G.A.* Detecting electrical activity from Martian dust storms // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. № 2. P. 3795–3801.
- Farrell W.M., Smith P.H., Delory G.T., Hillard G.B., Marshall J.R., Catling D., Tratt D.M., Renno N., Desch M.D., Cummer S.A., Houser J.G., Johnson B.* Electric and magnetic signatures of dust devils from the 2000–2001 MATADOR desert tests // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. P. E03004.
- Fedorova A.A., Montmessin F., Rodin A.V., Korablev O.I., Määttänen A., Maltagliati L., Bertaux J.L.* Evidence for a bimodal size distribution for the suspended aerosol particles on Mars // *Icarus.* 2014. V. 231. P. 239–260.
- Fitzjarrald D.E.* A field investigation of dust devils // *J. Appl. Meteorol.* 1973. V. 12. P. 808–813.
- Forget F., Hourdin F., Fournier R., Hourdin C., Talagrand O., Collins M., Lewis S.R., Read P.L., Huot J.P.* Improved general circulation models of the martian atmosphere from the surface to above 80 km // *J. Geophys. Res. Planets.* 1999. V. 104. № E10. P. 24155–24175.
- Forget F., Montmessin F., Bertaux J.L., González-Galindo F., Lebonnois S., Quemerais E., Reberac A., Dimarellis E., López-Valverde M.A.* Density and temperatures of the upper Martian atmosphere measured by stellar occultations with Mars Express SPICAM // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. P. E01004.
- Gierasch P.J., Goody R.M.* The effect of dust on the temperature of the Martian atmosphere // *J. Atmosph. Sci.* 1972. V. 29. P. 400–402.
- Golitsyn G.S.* A similarity approach to the general circulation of planetary atmospheres // *Icarus.* 1970. V. 1. № 1. P. 1–24.
- Golitsyn G.S.* On the Martian Dust Storms // *Icarus.* 1973. V. 18. № 1. P. 113–119.
- González-Galindo F., López-Valverde M. A., Angelats i Coll M., Forget F.* Extension of a Martian general circulation model to thermospheric altitudes: UV heating and photochemical models // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. P. E9008.
- Izvekova Yu.N., Popel S.I.* Charged Dust Motion in Dust Devils on Earth and Mars // *Contrib. Plasma Phys.* 2016. V. 56. № 3–4. P. 263–269.
- Jackson T.L., Farrell W.M.* Electrostatic fields in dust devils: an analog to Mars // *IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing.* 2006. V. 44. № 10. P. 2942–2949.
- Lacks D.J., Levandovsky A.* Effect of particle size distribution on the polarity of triboelectric charging in granular insulator systems // *J. Electrostatics.* 2007. V. 65. № 2. P. 107–112.
- Leovy C.B., Zurek R.W., Pollack J.B.* Mechanisms for Mars dust storms // *J. Atmosph. Sci.* 1973. V. 30. P. 749–762.
- Mattsson J.O., Nihlen T., Yue W.* Observations of dust devils in a semi-arid district of southern Tunisia // *Weather.* 1993. V. 48. P. 359–363.
- Melnik O., Parrot M.* Electrostatic discharge in Martian dust storms // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. № A12. P. 29107–29117.
- Metzger S.M.* Dust devils as aeolian transport mechanisms in southern Nevada and in the Mars Pathfinder landing site. Ph. D. thesis, Univ. of Nev., Reno. 1999.
- Michael M., Tripathi S.N., Mishra S.K.* Dust charging and electrical conductivity in the day and nighttime atmosphere of Mars // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. P. E7010.
- Montmessin F., Bertaux J.L., Quemerais E., Korablev O., Rannou P., Forget F., Perrier S., Fussend D., Lebonnois S., Réberac A., Dimarellis E.* Subvisible CO₂ ice clouds detected in the mesosphere of Mars // *Icarus.* 2006. V. 183. № 2. P. 403–410.
- Montmessin F., Gondet B., Bibring J.P., Langevin Y., Drossart P., Forget F., Fouchet T.* Hyperspectral imaging of convective CO₂ ice clouds in the equatorial mesosphere of Mars // *J. Geophys. Res.* 2007. 112. P. E11S90.
- Němec F., Morgan D.D., Gurnett D.A., Brain D.A.* Areas of enhanced ionization in the deep nightside ionosphere of Mars // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. P. E06006.
- Onishchenko O.G., Horton W., Pokhotelov O.A., Stenflo L.* Dust devil generation // *Phys. Scripta.* 2014. V. 89 № 7. P. 075606.
- Onishchenko O.G., Horton W., Pokhotelov O.A., Fedun V.* “Explosively growing” vortices of unstably stratified atmosphere // *J. Geophys. Res. Atmospheres.* 2016. V. 121. № 19. P. 7197–7214.
- Pätzold M., Tellmann S., Häusler B., Hinson D., Schaa R., Tyler G.L.* A sporadic third layer in the ionosphere of Mars // *Science.* 2005. V. 310. № 5749. P. 837–839.
- Popel S.I., Gisko A.A.* Charged dust and shock phenomena in the Solar System // *Nonlinear Proc. in Geophys.* 2006. V. 13. P. 223–229.

- Popel S.I., Kopnin S.I., Yu M.Y., Ma J.X., Feng Huang.* The effect of microscopic charged particulates in Space Weather // *J. Physics D: Appl. Phys.* 2011. V. 44. P. 174036.
- Renno N.O., Wong A.S., Atreya S.K., de Pater I., Roos-Sette M.* Electrical discharges and broadband radio emission by Martian dust devils and dust storms // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30. № 22. P. 2140.
- Ruf C., Renno N.O., Kok J.F., Bandelier E., Sander M.J., Gross S., Skjerve L., Cantor B.* Emission of non-thermal microwave radiation by a Martian dust storm // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. № L13202.
- Ryan J.A., Carroll J.J.* Dust devil wind velocities: Mature state // *J. Geophys. Res.* 1970. V. 75. P. 531–541.
- Ryan J.A., Lucich R.D.* Possible dust devils, vortices on Mars // *J. Geophys. Res. Oceans.* 1983. V. 88. № C15. P. 11005–11011.
- Rybakov V.A., Nemtchinov I.V., Shuvalov V.V., Artemiev V.I., Medveduk S.A.* Mobilization of dust on the Mars surface by the impact of small cosmic bodies // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102. P. L13202.
- Sinclair P.C.* Some preliminary dust devil measurements // *Mon. Weather Rev.* 1964. V. 22. № 8. P. 363–367.
- Sinclair P.C.* The lower structure of dust devils // *J. Atmos. Sci.* 1973. V. 30. P. 1599–1619.
- Sternovsky Z., Chamberlin P., Horanyi M., Robertson S., Wang X.* Variability of the lunar photoelectron sheath and dust mobility due to solar activity // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. P. A10104.
- Stubbs T.J., Vondrak R.R., Farrell W.M.* A dynamic fountain model for lunar dust // *Adv. Space Res.* 2006. V. 37. P. 59–66.
- Stubbs T.J., Vondrak R.R., Farrell W.M., Collier M.R.* Predictions of dust concentrations in the lunar exosphere // *J. Astronautics.* 2007. V. 28. P. 166–167.
- Tratt D.M., Hecht M.H., Catling D.C., Samulon E.C., Smith P.H.* In situ measurements of dust devil dynamics: Toward a strategy for Mars // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. P. E115116.
- Yair Y.* New results on planetary lightning // *Adv. Space Res.* 2012. V. 50. № 3. P. 293–310.
- Zhai Y., Cummer S.A., Farrell W.M.* Quasi-electrostatic field analysis and simulation of Martian and terrestrial dust devils // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. P. E06016.