

Пылевые дьяволы на Земле и на Марсе

О.Г. ОНИЩЕНКО,
доктор физико-математических наук
Институт физики Земли РАН,
Институт космических исследований РАН
О.А. ПОХОТЕЛОВ,
доктор физико-математических наук
Институт физики Земли РАН
Н.М. АСТАФЬЕВА,
доктор физико-математических наук
Институт космических исследований РАН



Пылевые дьяволы – удивительное и загадочное атмосферное явление. Они представляют собой нестационарные вихревые структуры, возникающие в приповерхностном слое днем

в безветренную, обычно жаркую погоду при сильном прогреве планеты солнечными лучами. В отличие от торнадо, такие структуры не связаны с облаками и обычно существуют в

ясный день. Они видны благодаря мелкой пыли, увлекаемой воздушными потоками. Пылевые дьяволы наблюдаются на Земле и на Марсе.



ЧТО ТАКОЕ ПЫЛЕВЫЕ ДЬЯВОЛЫ?

Пылевые смерчи – вращающиеся столбы поднимающейся пыли. Самые мелкие из них на нашей планете иногда видны на открытых городских пространствах. Часто в ветреную погоду вблизи длинных зданий можно заметить неожиданно возникающие пылевые смерчи. Их происхождение связано с порывами ветра. Вблизи стены скорость ветра близка к нулю и быстро возрастает на некотором от нее расстоянии. Механизм генерации таких вихрей в неоднородном (сдвиговом) потоке хорошо известен и изучен в гидродинамике более ста лет назад и связан с неустойчивостью Кельвина – Гельмгольца. Аналогичные вихри можно наблюдать за кормой движущегося корабля.

Наряду с такими пыльными смерчами в атмосфере Земли существуют мощные мезомасштабные торнадо, генерируемые в грозовом облаке. Торнадо представляет собой быстро вращающуюся воронку, свисающую из кучево-дождевых облаков и нисходящую как воронкообразное облако пониженного давления. Вытянутую до поверхности воронку часто называют “хоботом”. Достигая земли, она “засасывает” вверх пыль и другие предметы (крыши домов, небольшие постройки и автомобили), что приводит к значительным разрушениям.

Кроме описанных выше пылевых смерчей в засушливых и пустынных районах Земли в спокойную, безветренную и солнечную погоду возникают пылевые вихри загадочного происхождения. В Казахстане,

Пылевые дьяволы вблизи г. Феникс (США). 7 мая 2012г. Фото Б. Уитекера.

Арабских Эмиратах, Египте и в ряде других стран такие пылевые смерчи называются джиннами. Джинн – один из главных героев волшебных арабских сказок, он известен, в частности, по книге Л. Лагина “Старик Хоттабыч”. В англоязычных странах их часто называют пылевыми дьяволами (dust devils). Чтобы не путать такие вихри с хорошо объяснимыми пылевыми смерчами в неоднородных порывах ветра или более мощными торнадо, будем называть их пылевыми дьяволами. История регулярных наблюдений пылевых дьяволов длится уже более 150 лет. Эти атмосферные явления менее опасны, чем крупномасштабные торнадо. Поэтому

изучение загадочных пылевых дьяволов в течение длительного времени находилось вдали от основных направлений метеорологических исследований. Интерес к ним значительно возрос после того, как стало известно, что более мощные, чем на Земле, пылевые дьяволы есть на Марсе. Впервые они были обнаружены в конце 1970-х гг. американскими орбитальными аппаратами АМС “Викинг” (“Viking”; Земля и Вселенная, 1976, № 3; 1977, № 3). С этого момента пылевые дьяволы интенсивно обсуждаются в научной литературе и на конференциях.

В основе генерации пылевых дьяволов лежит процесс салтации (saltation), при котором хорошо подогретый конвективный поток воздуха подхватывает с поверхности планеты крупные частицы песка, увлекающие, в свою очередь, в совместное движение мелкие частицы пыли в виде миниатюрного торнадо. Такие структуры со спиралевидным восходящим потоком переносят пыль на большие высоты, где они могут оказывать большое влияние на погоду и климат. Из наблюдений установлено, что в открытой местности число вихрей с направлением вращения по часовой стрелке (антициклонических) и против (циклонических) совпадает.

Пылевые дьяволы могут генерировать силь-

ные электростатические поля из-за трения между пылью, песком и поверхностью Земли. Подхваченные горячие частицы пыли и песка в сухой атмосфере, в результате многочисленных столкновений приобретают электрический заряд (трибоэлектрический эффект). Например, известно явление электростатического электричества, если янтарь потереть о шерсть или расчесать волосы пластмассовой расческой. Частицы пыли и песка образуют трибоэлектрическую пару. При столкновении более тяжелые частицы (больших размеров) теряют электроны, отдавая их более легким частицам. Легкие частицы уносятся в гравитационном поле вверх, оставляя тяжелые внизу. Разделение зарядов создает гигантскую электрическую батарею. Разделение частиц пыли (пудры) по массе широко используется в промышленности, в частности, фармацевтической.

АМС “Викинг” и марсоход “Оппортьюнити” (“Opportunity”; Земля и Вселенная, 2004, № 1, с. 36–37; 2004, № 3, с. 22–27) позволили обнаружить многочисленные пылевые дьяволы на Марсе. Из-за разреженности атмосферы марсианские смерчи могут превышать свои земные аналоги в сотни раз. Пылевые смерчи выбрасывают в атмосферу планет тонны электрически заряженных пылевых частиц. Играя важ-

ную роль в формировании климата, они представляют реальную опасность для спускаемых аппаратов и для человека, когда тот ступит на поверхность красной планеты. Они могут инициировать молнии и электрические разряды, выводящие из строя электронные устройства, создавать помехи радиосвязи.

ПЫЛЕВЫЕ ДЬЯВОЛЫ НА ЗЕМЛЕ

Пылевые дьяволы чаще всего встречаются в засушливых пустынных регионах, в частности в Австралии, Африке, Перу и США. Особенно часто они возникают в пустыне Сахара. Серый столб пыли при этом поднимается до самых облаков. Летчики наблюдают восходящие потоки воздуха и пылевые смерчи порой на высоте в несколько километров. Николай Гумилёв – не только выдающийся поэт Серебряного века русской поэзии, но и один из крупнейших исследователей Африки. Вот как в стихотворении “Сахара” он описывает свои наблюдения пылевых смерчей:

*И звенит и поет, поднимаясь, песок,
Он узнал своего господина,
Воздух меркнет, становится
солнца зрачок,
Как гранатовая сердцевина.
И чудовищных пальм вековые
стволы,
Вихри пыли взметнулись и
пухнут,
Выгибаясь, качаясь, проходят
среди мглы,
Тайно веришь – вовеки не
рухнут.*



Пылевой смерч в Долине Эльдорадо (штат Невада, США). Фото Т. Майкла.

*Так и будут бродить до скончания веков,
Каждый час все грозней и грознее,
Головой пропадаю среди облаков,
Эти страшные серые змеи.
Но мгновение... отстанет и дрогнет одна
И осядет песчаная гряда,
Это значит – в пути спотыкнулась она
О ревущего в страхе верблюда.*

Пылевые дьяволы возникают в различных регионах Земли. Например, в штатах Аризона и Невада (США) они стали объектом не только наблюдения, но и активного исследования. Б. Уитекер утверждает, что почти всегда можно увидеть множество пылевых дьяволов по дороге между городами Феникс

и Туксон (штат Аризона). В полдень 7 мая 2012 г. вблизи г. Феникс одновременно появились восемь пылевых дьяволов. В долине Эльдорадо (штат Невада) пылевой дьявол поднял тонны песка в атмосферу. Пылевой дьявол обнаружен в мексиканской пустыне весной, когда относительно холодный ветер дул над сухой пустыней. Можно сделать вывод, что пылевые дьяволы появляются в тихую солнечную погоду в отсутствие всякой грозовой деятельности. Они наиболее часто возникают в теплых засушливых регионах в летнее время. Иногда они также могут появляться зимой или весной, когда холодный воздух распространяется вдоль теплой земли даже в регионах субарктики.

Наряду с пылевыми дьяволами в море или на озерах наблюдаются водяные дьяволы аналогичного происхождения. При этом вместо пыли смерчи увлекают капли воды. Кроме того, во время пожара при полном штиле неожиданно



Пылевой дьявол в Новой Зеландии. Фото Х. Едена.



Пылевые вихри на Марсе. Снимок получен в мае 2005 г. марсоходом "Спирит". Фото NASA/JPL.

наблюдаются загадочные огненные дьяволы. Сами по себе они не несут опасности, но в сочетании с другими природными или окружающими их факторами способны привести к беде. Так, в 1923 г. огненный вихрь, образовавшийся во время Великого землетрясения Канто в Японии, погубил 38 тыс. человек всего за 15 мин.

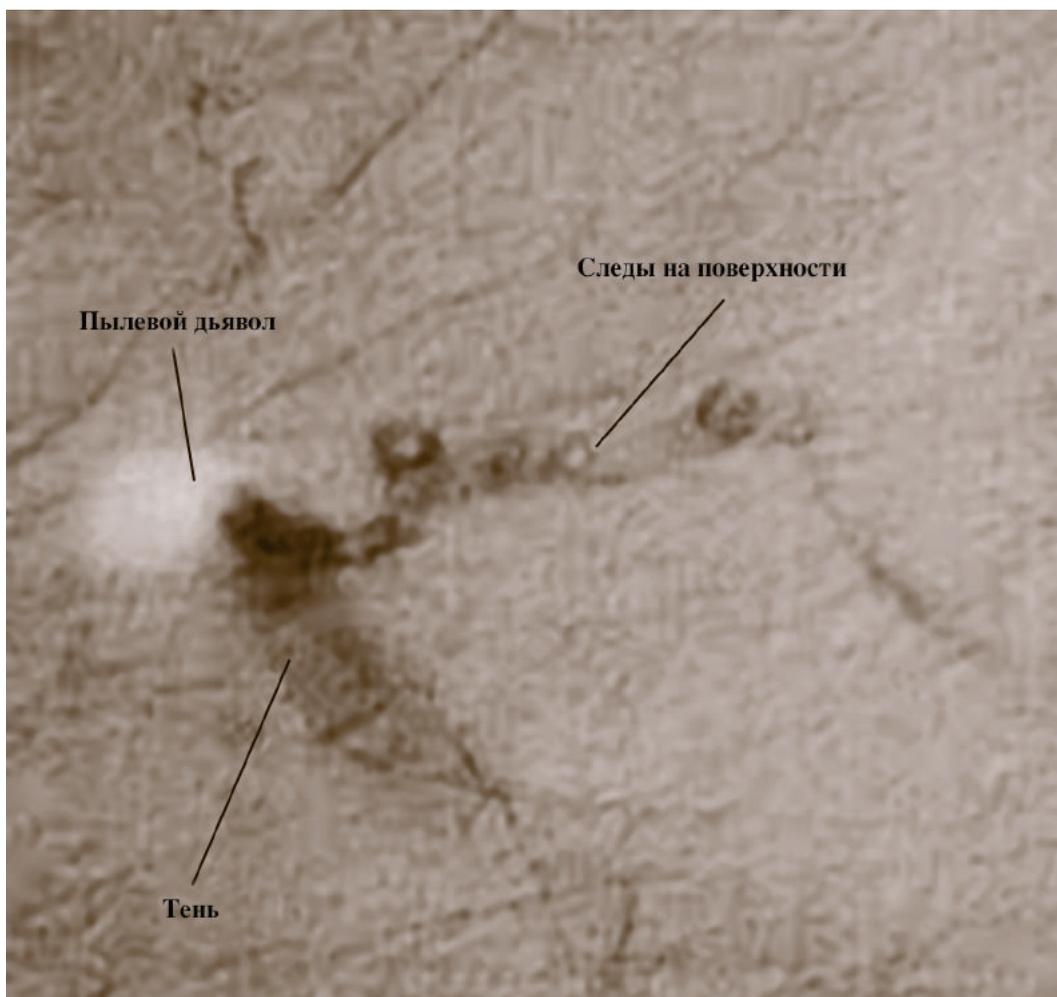
Высота пылевых дьяволов определяется дистанционно с Земли или с самолета. Наблюдение "термик"¹ над мощными пылевыми дьяволами производилось на планерах. На высоте 2–4 км

возникают теплые потоки с температурой на несколько десятых градуса выше температуры окружающей среды с вертикальными скоростями ветра 2–4 м/с на площади 1–5 км². На периферии вихря существуют нисходящие потоки охлажденного воздуха. Это говорит о том, что крупные пылевые дьяволы связаны с более протяженными потоками восходящего теплого воздуха, который простирается далеко в высоту и в диаметре достигает нескольких километров перед возвращением. Они влияют на эрозию почвы, перемещая пыль с поверхности планеты и изменяя альбедо. Обычно перемещение песка и пыли в таких структурах носит локальный характер, не превышая нескольких десятков метров.

Однако региональные ветры могут существенно увеличить эти размеры. Согласно современным представлениям, в Сахаре они поднимают мелкую пыль в верхнюю атмосферу и могут переносить ее в Европу.

Высота пылевого дьявола зависит от условий атмосферы, от состава и количества пыли. Большая их часть имеет диаметр 1–15 м. Высота от нескольких метров до километра и несколько выше. Самые мощные на нашей планете пылевые дьяволы образуются в Австралии, их радиус достигает до 30–140 м и высота до 4500 м. С увеличением масштаба вихря растет время его существования – от нескольких секунд до 20 мин (в основном – 1–4 мин), хотя наблюдались крупные, существовавшие до не-

¹ **Термик** – термический поток поднимающегося воздуха, который может перемешиваться с окружающим воздухом. Планеристы назвали **термиками** потоки теплого воздуха от нагретого Солнцем грунта, в которых они могли парить.



скольких часов. Частота их появления сильно зависит от сезона, времени дня и географического места. В штате Аризона на площади 1 км² в течение дня можно увидеть более 750 пылевых дьяволов. Они обычно перемещаются со скоростью окружающего ветра. Типичная скорость вращения – порядка 5–10 м/с и обычно не превышает 25 м/с, вертикальная скорость в вихре не превышает 10 м/с. Электри-

ческое поле достигает 20 кВ/м, соответствующая плотность заряда составляет 10^5 – 10^7 электронов в кубическом метре.

ПЫЛЕВЫЕ ДЬЯВОЛЫ НА МАРСЕ

Атмосфера Марса, состоящая в основном из углекислого газа, очень разрежена. Давление у поверхности Марса в 160 раз меньше земного. Марс отнюдь не мертвый мир, где ничего не проис-

Следы нескольких пылевых вихрей на Марсе. Снимок получен АМС "Марс Глобал Сервейер". Фото NASA/JPL.

ходит. Одним из самых интересных и драматических атмосферных явлений Марса – пылевые дьяволы и связанные с ними бури.

В 1997 г. АМС "Марс Патфайндер" ("Mars Pathfinder"; Земля и Вселенная, 1997, № 4, с. 65–68; 1998, № 3, с. 51–54)

Вихрь в области Равнины Амазонии на Марсе. Изображение охватывает район размером 644 м. Снимок получен камерой высокого разрешения HiRISE 16 февраля 2012 г. АМС “Марсианский орбитальный разведчик”. Фото NASA/JPL.



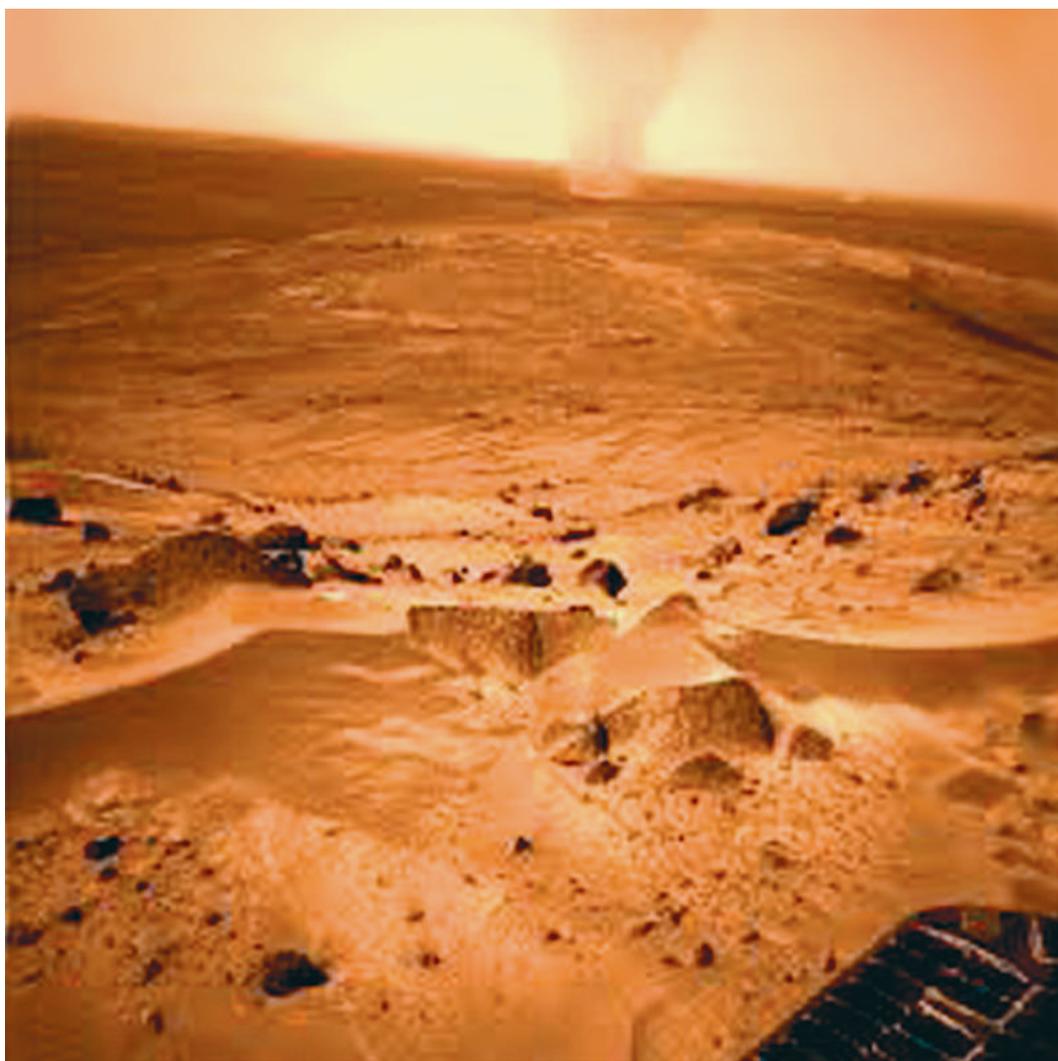
получила первое четкое изображение марсианского пылевого дьявола. С помощью камер высокого разрешения, установленных на АМС “Марс Глобал Сервейер” и “Марсианский орбитальный разведчик” (Земля и Вселенная, 1997, № 4, с. 64–65; 2007, № 5), было идентифицировано большое число пылевых дьяволов. Марс часто оказывается под властью пылевых бурь – ветры неумолимо перемалывают верхний иссушенный песчаный слой, застилая маревом обширные части планеты. Они появляются столь часто, что их многочисленные следы пересекают друг друга, позволяя проследить их пути на красно-

ватом грунте. Марсианская пыль включает в себя смесь частиц размером примерно микрон (в 20 раз меньше толщины человеческого волоса) – своеобразное подобие цементного порошка. Причудливые следы (темные полосы), оставленные на поверхности Марса крупными пылевыми смерчами, хорошо видны на снимках многих регионов планеты. Например, на фотографии гигантской низменности Равни-

на Амазонии, полученной 9 мая 2012 г. камерой HiRISE АМС “Марсианский орбитальный разведчик”, виден гигантский пылевой дьявол, отбрасывающий длинную тень (Земля и Вселенная, 2012, № 6, с. 29–31). По длине тени пылевого дьявола можно определить высоту вихря, он достигает примерно 800 м, в диаметре – около 30 м. Сцена не редкая для последних весенних дней на севере Марса. На другом

Крутящийся столб пыли высотой примерно 20 км на Марсе. Несмотря на внушительную высоту, диаметр пылевого дьявола всего 64 м. Снимок получен камерой высокого разрешения HiRISE 14 марта 2012 г. АМС “Марсианский орбитальный разведчик”. Фото NASA/JPL.





снимке, сделанном этой же станцией, зафиксирован гигантский пылевой столб диаметром 64 м и высотой 20 км, мчащийся по марсианским просторам. Марсоходу “Спирит” (“Spirit”) также удалось запечатлеть на снимке пылевой дьявол.

Ветер и связанные с ним пылевые дьяволы могут влиять на механизм, запускающий гигантские пылевые бури, – плохо

изученное явление. Существует мнение, что пылевые дьяволы и связанные с ними пылевые бури на поверхности Марса, способные перемещать большие массы пыли и песка, могут быть причиной отсутствия жизни на поверхности планеты. Предполагается, что бури могут быть источником образования ядовитого соединения перекиси водорода и других

Пылевой смерч в кратере Гусева на Марсе. Снимок сделан в декабре 2013 г. марсоходом “Кьюриосити”. Фото NASA/JPL.

коррозийных химикатов. Жизнь не смогла бы закрепиться и процветать при данных природных условиях.

Большую часть времени атмосфера находится

в механическом (или гидростатическом) равновесии, когда уравновешены эффекты гравитации и атмосферного давления. В такой атмосфере обычно отсутствует макроскопическое движение. Значительную часть времени термодинамическое состояние атмосферы близко к равновесному адиабатическому состоянию с вертикальным градиентом температуры. В такой атмосфере температура убывает примерно на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ при удалении от поверхности на высоту 1 км. Этот факт хорошо известен, в частности, альпинистам. Однако временами нагреваемая солнечным излучением атмосфера может быть далека от термодинамически равновесного адиабатического состояния. Если градиент температуры больше адиабатического, то в этом слое возникает интенсивное конвективное движение с восходящими потоками воздуха. Условие конвективной неустойчивости известно как критерий К. Шварцшильда. Слой атмосферы, в котором выполняется критерий Шварцшильда, называют конвективно неустойчивым.

В работе О.Г. Онищенко, В. Хортон, О.А. Похотелова и Л. Стенфло (2014) в рамках упрощенной гидродинамической модели исследована генерация пылевых дьяволов в конвективно неустойчивой атмосфере. В атмосфере с зародышевым медленным крупномасштабным движением (вращением вдоль вертикальной оси) из конвективных ячеек генерируются мелкомасштабные вихри с сильным торoidalным вращением – это пылевые дьяволы.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Согласно современным представлениям, земные вихревые конвективные структуры, нагруженные пылью, играют более важную роль в формировании климата, фотохимии атмосферы и биохимии океана, чем предполагали ранее. Значительное число аварий легких самолетов, планеров и вертолетов вызваны порывами ветра, связанными с этими структурами.

Следующие несколько десятилетий станут свидетелями исследований Марса с помощью автоматических межпланетных станций и пилотируемых

экспедиций. Для планирования полетов необходимо четкое понимание явлений, протекающих на Марсе. Пылевые дьяволы влияют на климат, эрозию и седиментацию на Марсе. Необходимость изучения их влияния на функционирование солнечных батарей автоматических станций на Марсе стимулировала NASA создать международные коллективы ученых по программам HEDS (Исследование и освоение космического пространства) и MATADOR (Атмосфера Марса и пыль в оптическом и радиодиапазоне). Цель этих программ – комплексное изучение пылевых дьяволов на Земле и на Марсе.

Марсианские пылевые дьяволы сильно наэлектризованы, предполагается, что это может приводить к мощным разрядам или пробоям, повышенному “прилипанию” пыли к космическим скафандрам будущих путешественников и их оборудованию, а также нарушению радиосвязи. Кроме того, космические устройства, посланные на Марс, должны выдерживать пребывание в гигантской “пескоструйной камере”.