**ЧЕМ ЧРЕВАТ ГРАД ИЗ КОСМОСА?**

Обычный град человеку хорошо знаком. Чаще всего он не представляет никакой опасности. Лишь очень крупные градины размером более 1 см могут нанести некоторый ущерб: пробить непрочную кровлю, повредить посевы, ранить животное или человека. Отличительная особенность града как явления в том, что оно сводится к одновременному действию громадного числа сравнительно мелких частиц при сравнительно высокой их концентрации. И там, где одна частица могла бы не вызвать никакого эффекта за счет малой вероятности попадания в уязвимое место (подобно не полностью разрушившемуся космическому аппарату, сходящему с орбиты вокруг Земли), громадное число частиц воздействие наверняка окажет. В этом и проявляется эффект большого числа частиц для обычного града — ледяных частиц, образующихся в атмосфере при определенных условиях. А что произойдет, если в атмосферу Земли или другой планеты попадет большое число мелких частиц, не обязательно ледяных, но со столь же высокой концентрацией, влетающих из космоса с большой скоростью?

**Возможен ли космический град?**

Прежде всего возникает вопрос, может ли такое явление вообще иметь место. Влет отдельной частицы в атмосферу представляет собой, очевидно, факт вполне заурядный. Периодически Земля проходит через различные метеорные потоки (Леонид в ноябре, Персеид в августе, Драконид в октябре и др.). Если Земля оказывается в центральной части таких потоков, ночное небо озаряется вспышками тысяч метеоров. Это так называемые метеорные дожди. Однако и тогда концентрация влетающих частиц остается на много порядков меньше, чем в случае обычного града. Мы же ставим вопрос именно о потоках частиц с высокой концентрацией, как у града.

В естественных условиях такая высокая концентрация возникает при дроблении достаточно крупного метеороида, входящего в атмосферу, когда аэродинамическая нагрузка начинает превышать предел прочности тела. В зависимости от состава и прочностных свойств тело может развалиться при этом или на несколько крупных кусков, или на большое количество мелких. В последнем случае возникает поток частиц, напоминающий град. Не исключена и другая ситуация, когда достаточно хрупкое космическое тело рассыпается на множество мелких осколков под воздействием гравитационных или электромагнитных сил еще до входа в плотные слои атмосферы [1]. Достаточно высокая концентрация мелких частиц бывает также вблизи ядра кометы. И если такое ядро пролетит рядом с планетой, в атмосферу может одновременно вторгнуться громадное число пылинок. Наконец, в последние годы люди осознали, что вероятность столкновения Земли с крупным космическим телом типа астероида или кометы вовсе не равна нулю. Это — так называемая астероидная опасность [2]. Размышляя о том, как предотвратить ее, некоторые авторы предлагают разрушить подлетающее космическое тело ядерным взрывом, т.е. по существу превратить его в конгломерат пыли, крупных и мелких осколков и газа, создав таким образом достаточно концентрированный поток частиц разных размеров. Считается, что столкновение планеты с таким газопылевым облаком менее опасно, чем с одним компактным телом. Как будет показано ниже, это, строго говоря, заблуждение. Во многих случаях опасность от этого только усугубится. Как раз данное обстоятельство и подвигло нас провести исследования взаимодействия громадного количества мелких частиц с планетной атмосферой [3, 4], т.е. по существу выяснить, как поведет себя град, прилетающий из космоса, какую угрозу он в себе таит.

В этом аспекте интересны именно интенсивные взаимодействия больших объемов мелких частиц (космической пыли) с земной атмосферой, т.е. такие, когда концентрация влетающих частиц столь велика, что они взаимодействуют с атмосферным воздухом коллективным образом, а не индивидуально. Это примерно соответствует концентрации частиц обычных градин.

Сразу стоит отметить важнейшее отличие космического града от земного: скорость влета его частиц в атмосферу чрезвычайно высока. По законам небесной механики диапазон скоростей, с которыми тела могут влетать в земную атмосферу, заключен в пределах от 11.2 км/с до 70 км/с, т.е. от второй космической скорости для Земли до максимальной относительной скорости тел, принадлежащих к Солнечной системе. Соответственно кинетическая энергия и воздействие такого града будут неизмеримо выше. Другое важное отличие в том, что сначала он попадает в очень разреженные слои атмосферы, но затем плотность атмосферы и, естественно, взаимодействие резко нарастают, т.е. налицо сильная зависимость всех характеристик града от высоты над поверхностью планеты.

Возникают интересные вопросы. Сможет ли атмосфера защитить планету от такого града? Как будет происходить взаимодействие громадного количества частиц с атмосферой? Как оно будет зависеть от размеров и формы облака частиц, размеров и концентрации частиц в нем, плотности и состава их вещества, скорости влета в атмосферу? До какой высоты будут опускаться пылевые частицы? Полностью они будут испаряться или сгорать в атмосфере, либо их остатки, затормозившись, выпадут на Землю? Будут ли образовываться в атмосфере ударные волны, и какова будет их интенсивность и конфигурация? Будут ли они воздействовать на земную поверхность? Какие при этом будут возникать температуры? Возможно ли и при каких условиях возникновение мощного светового излучения, действующего на поверхность Земли? Каковы другие механизмы опасного воздействия на планету?

**Явление глазами математики**

Процессы, сопровождающие влет в атмосферу отдельной небольшой частицы или крупного тела, уже достаточно хорошо изучены — как теоретически, так и инструментально. А вот интенсивное взаимодействие влетающего из космоса облака мелких частиц с земной атмосферой до последнего времени не исследовалось. Поэтому об особенностях возникающих при этом физических процессов ничего не было известно. Рассматриваемое нами явление весьма сложное и носит гипотетический характер — реально наблюдать в природе его пока не приходилось, и в лабораторных условиях его не воспроизвести. Остается изучать его с помощью математического моделирования.

Проанализировать совместное двухфазное движение космических частиц и атмосферного воздуха позволяет хорошо известная модель двух взаимно проникающих континуумов [5]. Один из них — газовая среда, характеризующаяся рядом параметров, и прежде всего — давлением. Второй — среда пылевых частиц, в которой собственное давление отсутствует. Предполагается, что частицы занимают очень малый объем по сравнению с объемом газа. Для частиц космической пыли это так и есть. В расчетах мы изменяли начальную объемную долю частиц a0 в диапазоне от 10-9 до 10-3.

Что выбрать в качестве вещества частиц? Учитывая распространенность ледяных тел в космосе, мы остановились на льде нормальной плотности, и в этом полная схожесть с обычным градом. Для сравнения производимых эффектов рассматривались также частицы из льда пониженной плотности и из железа.

Возможны разнообразные формулировки возникающих задач, что связано с различными предположениями о геометрии течения. В общем случае к планете, обладающей атмосферой, подлетает облако мелких частиц произвольной формы и размера.

С точки зрения расчета наиболее проста одномерная постановка задачи, когда единственная координатная переменная — это высота над поверхностью Земли. Но более реалистично рассматривать эволюцию облака двумерной геометрии с осевой симметрией вокруг вектора скорости прилета. Ниже результаты приводятся именно для такого случая. Здесь частицы, подлетая к Земле по вертикали, первоначально заполняют сферический или другой осесимметричный объем. По мере опускания такого облака характеристики течения двухфазной системы начинают зависеть не только от времени и вертикальной координаты, но и от координаты поперечной — расстояния от оси падения.

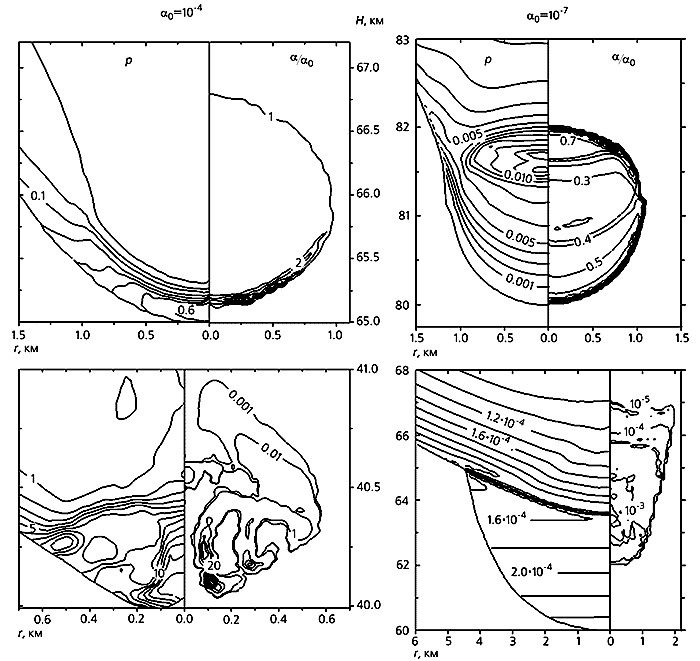
|  |  |
| --- | --- |
|  | **Схема подлета к планете облака мелких частиц  (n0— скорость облака как целого).** |

Получающаяся система уравнений решалась численно с помощью модификации повышенной точности известного конечно-разностного метода С.К.Годунова. Имеет смысл выделить два крайних случая взаимодействия: локальное, когда облако частиц ничтожно в масштабах планеты и воздействует лишь на ограниченную область атмосферы, и глобальное, когда размер облака сопоставим с диаметром планеты.

**Задачи о локальных взаимодействиях**

Поведение града “местного значения” анализировалось на примере взаимодействия с атмосферой Земли частиц, занимающих шар диаметром от 0.1 до 10 км.

Качественные особенности течения таковы. При относительно большой концентрации частиц (например, при их начальной объемной доле a0=10-4) самые интенсивные процессы взаимодействия протекают в головной части облака. Там повышается давление, возрастает концентрация частиц, перед облаком образуется мощная ударная волна. В основной части облака взаимодействие вначале слабое: скорости частиц и атмосферного газа быстро выравниваются, что в дальнейшем способствует гораздо более глубокому их проникновению в атмосферу по сравнению со случаем влета одиночной частицы. Позднее облако приобретает весьма сложную конфигурацию, по существу распадаясь на отдельные фрагменты. Характерно, что в этом случае, как и в других, не происходит увеличения поперечного сечения облака в процессе взаимодействия. Испаряясь, частицы значительно теряют массу (на уровне 30 км остается около 3% от первоначальной), а затем и полностью исчезают. Их пары, сохраняющие высокую скорость, проходят еще значительное расстояние, прежде чем на высоте H~20 км начинается их существенное торможение. После этого ударная волна продолжает свое движение свободно, как это бывает при взрыве в атмосфере. При ее подходе к земной поверхности избыточное давление составит для приведенного на рисунке примера 0.1 атм, от чего в домах могут быть выбиты все стекла.



**Пространственная эволюция течения по мере опускания сферического облака в атмосфере. Изолинии давления воздуха p (атм, левые части рисунков) и объемной доли частиц a/a0 (правые части рисунков) показаны в полуплоскости высота—радиальная координата ввиду предполагаемой осевой симметрии течения. Даны картины динамики для плотного (с начальной концентрацией частиц a0=10–4) и разреженного (a0=10–7) облаков.**

Для малой концентрации частиц (например, при a0=10-7) процесс взаимодействия сразу охватывает весь объем влетающего облака. Головная ударная волна вначале не образуется. В пределах облака, а затем и с некоторым отставанием от него, образуется волна сжатия, которая постепенно усиливается, превращается в ударную волну (гораздо более слабую, чем в первом случае), проходит через почти полностью испарившееся и затормозившееся облако частиц и вырывается вперед.

Для влета сферических облаков космического града минимально опасные значения a0 можно оценить как a0=10–5 при R0=1 км и a0=10–7 при R0=10 км для скоростей порядка 20—30 км/с. Массы пылевых облаков составят в этих случаях около 4·107 и 4·108 кг, а кинетические энергии — около 1.8—4.1 Мт и 18—41 Мт. Если предположить, что такие облака образовались в результате разрушения сферических ледяных тел, то для радиусов этих тел получатся не такие уж большие значения — приблизительно 20 и 45 м.

**Глобальные взаимодействия. Что случилось с Марсом?**

Поскольку при глобальных взаимодействиях облака частиц (считаем их осесимметричными) сопоставимы по своим размерам с диаметром планеты, возмущениями будет охвачена вся атмосфера. Начнем со случая взаимодействия гигантского облака частиц с атмосферой Марса, и вот почему.

Как известно, атмосфера Марса в настоящее время весьма разрежена: давление и плотность у поверхности планеты примерно в 100 раз меньше земных значений. Полеты космических аппаратов дают все больше информации в пользу того, что в далеком прошлом (2—4 млрд лет назад) атмосфера там была гораздо более плотная, в какой-то степени напоминающая нынешнюю земную, но состоявшая в основном из углекислого газа.

Существует эволюционный сценарий, который объясняет потерю Марсом атмосферы [6]. В предельно краткой и упрощенной форме он выглядит так. На раннем этапе эволюции Марса круговорот углекислого газа на планете поддерживался, с одной стороны, за счет растворения CO2 в воде и образования карбонатных отложений, а с другой стороны — поставки CO2 в атмосферу в результате интенсивной вулканической деятельности. Именно на Марсе обнаружены самые большие среди планет Солнечной системы потухшие вулканы. По мере затухания вулканической деятельности атмосфера становилась все более разреженной, парниковый эффект ослабевал, температура понижалась, и, наконец, атмосфера пришла к ее нынешнему состоянию. Данная теория не стала общепризнанной, поскольку она не лишена внутренних противоречий и сталкивается с большими трудностями при объяснении некоторых фактов. В частности, есть свидетельства того, что перемена климата на Марсе произошла довольно быстро, а не в результате длительной и постепенной эволюции. Не обнаружены также пока и карбонатные отложения, которые должны были бы образовывать слой толщиной не менее 80 метров по всей поверхности Марса.

А не мог ли Марс потерять плотную атмосферу в ходе некоторого катастрофического процесса космического масштаба? Расчеты прямо показывают реальность такого события.

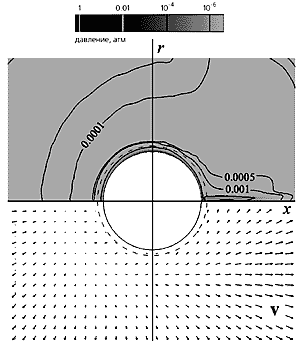
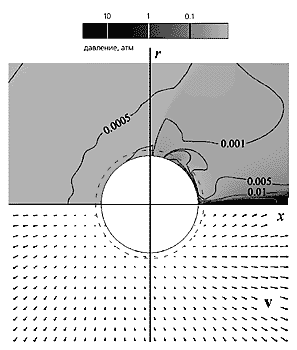
Речь идет о моделировании столкновения Марса с большим облаком мелких частиц, сопоставимым по своим размерам с планетой. Подобное облако могло образоваться поблизости от Марса в результате столкновения, например, двух крупных астероидов. В поясе астероидов, расположенном между орбитами Марса и Юпитера, таких тел и сейчас предостаточно, а в далеком прошлом их было еще больше, причем более крупных размеров (считается, что в этом поясе постоянно происходят процессы столкновения и дробления тел [7]). Не случайно автор книги [7], известный специалист в области физики метеоров и малых планет В.С.Гетман, называет этот пояс каменоломней Солнечной системы.

Древняя атмосфера Марса представляется с помощью изотермической экспоненциальной модели. Давление и плотность принимаются совпадающими у поверхности с современными земными значениями, но в силу меньшей силы тяжести на Марсе медленнее меняющимися с высотой (характеристическая высота атмосферы на Марсе H\* ~ 22 км по сравнению с H\* ~ 7 км для Земли).

Планета берется в виде твердого шара марсианского радиуса R = 3400 км. Предполагается, что на нее налетает облако частиц в виде цилиндрического слоя радиусом R0 и высотой L0 со скоростью n0, направленной вдоль оси цилиндра к центру планеты.

Рассмотрим два набора исходных параметров. В обоих случаях R0 = 1.1R (что больше радиуса Марса примерно на толщину его атмосферы). Начальный радиус каждой частицы равен 1 мм. В случае (а) L0 = =2R0, n0 = 40 км/с (что попадает примерно в середину возможного диапазона относительных скоростей космических тел в Солнечной системе), a0=10–4; во втором L0 = R0, n0 = 5 км/с (вторая космическая скорость у поверхности Марса), a0=10–5. Расчет начинается с высоты 400 км над поверхностью планеты.

На двух рисунках представлены распределение давления (тоновая шкала), плотности газа (изолинии с отмеченными значениями — в единицах невозмущенной плотности атмосферы у поверхности планеты) и поле скоростей газов (стрелки). Левый рисунок дает картину в момент времени t = 600 с после начала вторжения для первого случая. Максимальная скорость в показанной области достигает почти 30 км/c, что в шесть раз больше второй космической. Поэтому разлетающийся газ уже не сможет вернуться к планете и покинет ее навсегда. Распределение плотности показывает, что унос массы атмосферы в основном происходит в направлении движения пылевого облака, т.е. облако как бы срывает атмосферу с планеты и выталкивает ее в космос. Масса оставшейся части атмосферы (не первоначальной, а в смеси с парами частиц) по отношению к начальной массе атмосферы Марса составляет по расчету 0.33. На более поздних стадиях процесса наблюдается сложное течение вокруг планеты с отражениями от оси симметрии (значения давления и плотности у поверхности постепенно выравниваются).



**Модель столкновения большого облака мелких частиц с Марсом. На левом рисунке показаны распределения давления, плотности, а также поле скоростей газа около Марса через 600 с после вторжения облака (на высоте 400 км) при скорости n0=40 км/с. В этом случае облако срывает большую часть атмосферы планеты. На правом рисунке — характеристики атмосферы через 3000 с после вторжения облака вдвое меньшего объема, в 10 раз менее плотного и с начальной скоростью 5.3 км/с. Здесь окончательный результат столкновения противоположный — наращивание на 15% массы атмосферы Марса. Расчеты проводились для осесимметричной картины течения; x — координата вдоль вектора начальной скорости облака, r — расстояние от оси симметрии.**

Рисунок справа соответствует второму случаю и дает картину течения в момент времени t = 3000 с. Обращаем внимание, что стрелки, изображающие поле скоростей, для обоих рисунков даны в разных масштабах (во втором случае стрелки той же длины соответствуют примерно в шесть раз меньшей скорости, чем в первом). Здесь максимальные скорости в газе (5.3 км/c) лишь немного превосходят вторую космическую скорость, а распределение плотности таково, что уносится незначительная масса газа, поэтому атмосфера не теряет, а наращивает свою массу на 15% за счет паров частиц. Оба рисунка соответствуют примерно одной и той же стадии процесса. Здесь показаны картины течений после воздействия ударной волны на всю поверхность планеты.

Итак, в результате взаимодействия с пылевым облаком масса атмосферы может как существенно уменьшиться, так и возрасти.

В принципе, можно поставить следующую обратную задачу: найти такие параметры налетающего облака частиц, при которых будет уноситься заданная часть массы исходной атмосферы. Иначе говоря, зная нынешние характеристики марсианской атмосферы и предполагая, что в далеком прошлом у поверхности они были, например, как у Земли, можно определить (хотя, конечно, и неоднозначно) параметры облака, встреча с которым вызвала предполагаемую потерю марсианской атмосферы. А затем и оценить, какие процессы и тела могли породить такого “похитителя” атмосферы.

Возникает естественный вопрос: может ли такая катастрофа произойти с Землей?

Очевидно, взаимодействие космического облака частиц с атмосферой Земли имеет принципиально такой же характер, как и для Марса. Различие — только в других значениях параметров: размеров планеты, силы тяжести, второй космической скорости. Земля больше Марса и потерять атмосферу в результате подобного катастрофического процесса ей труднее, но такая возможность не исключена. Наши расчеты позволили установить, от столкновения с каким пылевым облаком это может случиться.

Правда, подробное исследование взаимодействия с атмосферой облаков частиц, которые могут унести в космос значительную часть атмосферы, для Земли не столь актуально, как для необитаемой планеты. Воздействие ударной волны и потоков излучения на земную поверхность будет заведомо губительно для жизни на Земле и при существенно меньшей энергии налетающего облака, когда об уносе значительной части атмосферы можно еще не говорить. Так, если размер облака сравним с диаметром Земли, то уже при небольших скоростях влета (скажем, со второй космической скоростью 11.2 км/с) ударная волна станет опасной даже для самого разреженного града — при наименьшем из рассмотренных значений начальной объемной доли частиц a0=10–9. Такой град, будь он локальным, вообще не создал бы для Земли никакой угрозы.

**Нужна предельная осторожность!**

Как уже упоминалось, существует важный практический аспект проблемы. В последнее время в научной и популярной литературе много говорится об опасности столкновения с Землей достаточно крупного космического тела — астероида или кометы. Обсуждаются различные способы предотвращения такого столкновения, в том числе — путем дробления тела на множество мелких осколков. Однако такой вариант спасения Земли нужно очень тщательной проработать — ведь в этом случае планета столкнется с большим потоком мелких частиц. А космический град, как мы показали, чреват не менее катастрофическими последствиями для жизни на Земле, чем столкновение с одним компактным телом. Тут требуется предельная осторожность, так как катастрофа может из локальной превратиться в глобальную. Работа в данном направлении поможет установить границы такой опасности, но уже ясно: устранять угрозу столкновения космического тела с Землей лучше путем изменения траектории его полета, а не разрушения.

Наши расчеты подтвердили, что в результате столкновения с большим пылевым облаком планета может лишиться своей атмосферы. При некоторых исходных параметрах налетающего облака частиц (в частности, при меньших скоростях) возможна и обратная ситуация, когда атмосфера существенно вырастет в своих объеме и массе. Но при этом, естественно, может радикальным образом измениться ее состав.

Остается надеяться, что с Землей этого никогда не произойдет. В то же время, имеет смысл повнимательнее вглядеться в окружающее нас космическое пространство. Возможно, где-то подобные взаимодействия иногда все же случаются. Мы установили, что они должны сопровождаться еще и мощными, хотя и кратковременными, световыми вспышками, которые можно зарегистрировать современной аппаратурой даже на межзвездных расстояниях. Обнаружение в космосе таких процессов дало бы много новой интересной информации.

И последнее. Сейчас между Россией и США идет дискуссия по вопросу разработки систем противоракетной обороны. Разрушение ядерных ракет в космосе, конечно, не создаст потоков частиц, способных воздействовать на Землю посредством ударной волны или светового излучения, поскольку у образовавшихся обломков и скорость невелика, и суммарная масса мала. Но здесь появляется третий, новый фактор опасности. Именно — распыление радиоактивного вещества в ближайшем космосе. Как поведут себя радиоактивные частицы? Сколько их выпадет на Землю? Как они распределятся по поверхности Земли? Каково и на каких площадях будет радиоактивное заражение? Все это вопросы, которые требуют тщательного анализа. Не исключено, что в результате “успешного” отражения ракетной атаки вся планета накроется радиоактивным облаком. И тогда вместо локального получится даже более опасное глобальное воздействие на планету, как и в случае разрушения подлетающего к Земле астероида.

**Литература**

1. *Millman P.M.* // Naturwissenschaften. 1979. V.66. P.134—139.   
2. *Алимов Р.В., Дмитриев Е.В.* Противоастероидная защита Земли // Природа. 1995. №6. С.94—101.   
3. *Плотников П.В., Шуршалов Л.В.* // Астрон. вестн. 1997. Т.31. №1. С.72—81.   
4. *Шуршалов Л.В., Плотников П.В.* // Тр. Мат. ин-та им.В.А.Стеклова. 1998. Т.223. С.255—263.   
5. *Нигматулин Р.И.* Основы механики гетерогенных сред. М., 1978.   
6. *Pollack J.B., Kasting J.F., Richardson S.M., Poliakoff K.* // Icarus. 1987. V.71. №2. P.203—224.   
7. *Гетман В.С.* Внуки Солнца. Астероиды. Кометы. Метеорные тела. М., 1989.