

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

523.74

ВОЛНЫ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ *)

Дж. Гослинг, А. Хундхаузен

Солнечный ветер — это внешняя атмосфера Солнца, расширяющаяся в космическое пространство. Изменения скорости ветра можно представить себе в виде волн скорости, которые по мере удаления от Солнца развиваются подобно волнам в океане, становящимся круче при приближении к песчаному берегу.

В течение столетий солнечная корона, разреженная внешняя атмосфера Солнца, была хорошо знакома наблюдателям как слабое серебристое свечение вокруг черного диска Луны во время полного затмения Солнца. Хотя корона впервые анализировалась спектроскопическими методами еще в XIX веке, наиболее замечательные из ее характеристик оставались неизвестными вплоть до сороковых годов нашего века. В это время было найдено, что неидентифицированные ранее эмиссионные линии в корональном спектре обусловлены излучением обычных элементов, таких, как кислород и железо, у которых удалена большая часть внешних электронов. Присутствие в короне таких высокоионизованных атомов можно объяснить, только предположив, что температура в короне выше миллиона градусов Кельвина, т. е. корона оказывается более чем в 100 раз горячее расположенной ниже видимой поверхности Солнца. Тепловая энергия ионизованного коронального газа в действительности столь велика, что даже огромное гравитационное поле Солнца не может удержать корону в статически связанный атмосфере **). Вместо этого корональный газ расширяется с огромной скоростью, заполняя межпланетное пространство солнечным ветром.

Спутники и космические корабли, зондирующие межпланетное пространство уже более пятнадцати лет, непосредственно брали образцы солнечного ветра и измеряли величину его потока в окрестности орбиты Земли. Наблюдения показали, что солнечный ветер течет почти радиально наружу от Солнца со средней скоростью 450 км/сек, т. е. со скоростью больше, чем полтора миллиона километров в час. Поток солнечного ветра, однако, далеко не однороден; в действительности он чрезвычайно

*) J. T. G o s l i n g, A. J. H u n d h a u s e n, Waves in the Solar Wind, *Scientific American* 236 (3), 36—43 (March 1977). Перевод Б. В. Сомова.

Дж. Т. Гослинг — сотрудник Лос-Аламосской научной лаборатории, А. Дж. Хундхаузен — сотрудник Высокопиротной обсерватории в Боулдерсе, штат Колорадо (США).

**) Сферически-симметричное решение, соответствующее гидростатической изотермической короне, характеризуется ненулевым давлением на бесконечности. (Примеч. пер.)

порывистый. Его скорость обычно меняется на несколько сотен километров в секунду за период около недели. Самые большие вариации можно представить себе как волны скорости, которые эволюционируют по форме, когда они распространяются от Солнца к внешним границам Солнечной системы. Другие типы волн также присутствуют в солнечном ветре, но они не будут интересовать нас здесь.

Как и корона, солнечный ветер представляет собой сильно разреженную плазму, или ионизованный газ, состоящий преимущественно из свободных протонов и электронов. Поскольку он расширяется почти радиально наружу от Солнца с приблизительно постоянной скоростью, его плотность уменьшается примерно обратно пропорционально квадрату расстояния от Солнца. На орбите Земли плотность составляет около 10 частиц в кубическом сантиметре, а на орбите Юпитера — около 4 частиц в кубическом сантиметре. По мере расширения солнечный ветер охлаждается, его температура падает от миллиона градусов у Солнца почти до ста тысяч градусов вблизи орбиты Земли. При такой температуре скорость звука в газе составляет около 50 км/сек. Поскольку на орбите Земли солнечный ветер проходит за секунду около 450 км, средняя скорость газа в девять раз больше, чем скорость звука, т. е. поток является сильно сверхзвуковым. Дальнейшие наблюдения на космических кораблях обнаружили, что солнечный ветер несет в себе слабый остаток солнечного магнитного поля. Вблизи орбиты Земли среднее значение поля равно 0,00005 гс (напряженность земного магнитного поля вблизи полюсов составляет 0,6 гс).

□

Для того чтобы понять, как возникают и развиваются волны в солнечном ветре, полезно представить себе солнечный ветер как обычную сжимаемую жидкость. Такой подход пренебрегает, однако, деталями сложных внутренних кинетических процессов, приводящих к тому, что такой разреженный газ ведет себя как жидкость. Вблизи земной орбиты плотность газа столь мала, что любой протон в солнечном ветре может столкнуться с одним из своих соседей в среднем лишь один раз за два или три дня. Поэтому причиной того, что заставляет разреженный газ вести себя как жидкость, должны быть процессы, отличающиеся от непосредственных столкновений между частицами. В настоящее время эти процессы поняты не полностью, хотя кажется вероятным, что ответственными за это могут быть присущие плазме, при наличии в межпланетном пространстве магнитного поля, неустойчивости.

Наблюдения с космических кораблей вблизи земной орбиты показали, что главные изменения скорости, плотности и давления в солнечном ветре обладают характерной структурой, которая показана на рис. 1 и стала известна как структура потоков солнечного ветра. На ведущем крае потока солнечного ветра скорость течения ветра быстро нарастает, на ведомом крае скорость много более медленно уменьшается до низких значений. На ведущем крае, где скорость нарастает, плотность частиц газа также увеличивается, быстро достигая максимума, который в несколько раз больше, чем средняя плотность. На ведомом крае, где скорость падает, уменьшается и плотность частиц, достигая аномально низких значений. Давление в потоке пропорционально произведению плотности на температуру и также достигает максимума, когда скорость растет. Затем давление быстро падает снова и остается почти постоянным на протяжении почти всей ведомой части потока. Эту характерную картину изменения вблизи орбиты Земли можно легко объяснить, если представить себе

поток как волну скорости, которая становится круче при распространении от Солнца.

Как возникают волны скорости в солнечном ветре? Что заставляет их становиться круче? Отсутствие однородности в скорости солнечного ветра происходит в конечном итоге из-за неоднородности температуры и плотности короны. Эта неоднородность возникает прежде всего из-за того, что солнечное магнитное поле, которое пронизывает корону, само неоднородно от одного места к другому на Солнце. Поэтому различные части короны, которые, убегая в космическое пространство, становятся солнечным ветром, расширяются наружу от Солнца с различными скоростями.

Посмотрим теперь, что происходит у Земли при вращении Солнца на один оборот каждые 27 дней. Попеременно медленный, затем быстрый, затем снова медленный газ направляется к Земле. Изменение скорости от низких значений к высоким и потом опять к низким составляет один целый поток или волну в солнечном ветре. Более быстро движущийся газ в волне догоняет более медленный газ впереди него и сталкивается с ним, одновременно убегая от газа позади него, который движется медленнее. В результате с увеличением расстояния от Солнца волна постепенно приобретает форму зуба пилы. Поскольку газ является сжимаемым, он перераспределяется в пределах волны, когда она становится круче. Отдельные части газа у ведущего края волны сжимаются и нагреваются, а в ведомом крае разрежаются и охлаждаются. Часть более медленно движущегося впереди газа увлекается волной и ускоряется. Результирующий перенос импульса и энергии от более быстрого газа к медленному будет слегка уменьшать амплитуду волны — максимальную разность скоростей газа при переходе от одной точки к другой в пределах волны. Наблюдатель вблизи орбиты Земли обычно видел развитую волну скорости с присущими ей областями сжатия и разрежения, которые проносятся мимо точки наблюдения. Временные изменения скорости, плотности и давления, связанные с потоками солнечного ветра, могут быть легко идентифицированы с такими эволюционирующими волнами скорости (см. рис. 1).

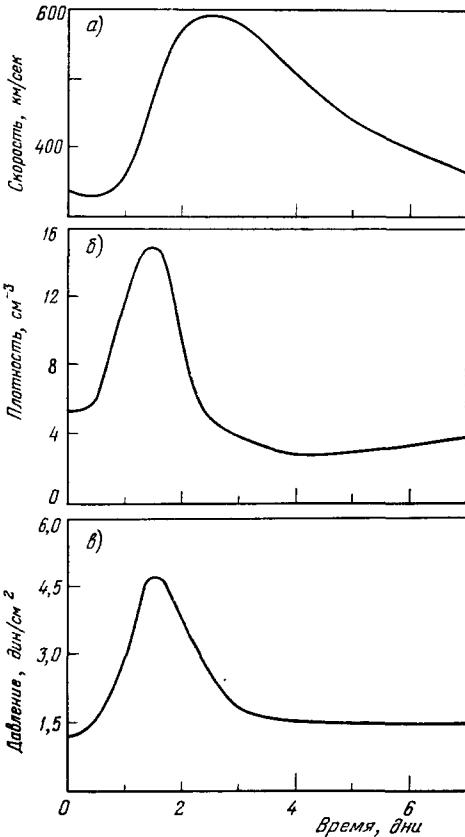


Рис. 1. Идеализированный профиль потока солнечного ветра, определенный на основании многочисленных наблюдений волн солнечного ветра, проносящихся мимо спутников на орбите Земли.

Ведущий край потока показан на левой стороне каждого рисунка. В пределах каждой волны скорость ветра быстро нарастает до максимума и затем более медленно уменьшается до низкого значения (a). Поскольку более быстро движущийся газ сталкивается с расположенным перед ним газом, который движется медленнее, плотность газа на ведущем крае быстро увеличивается (b). На ведомом крае возникает область разрежения. Когда плотность растет, давление газа также увеличивается, уменьшаясь затем в ведомой части волны (c).

Ведущий край потока показан на левой стороне каждого рисунка. В пределах каждой волны скорость ветра быстро нарастает до максимума и затем более медленно уменьшается до низкого значения (a). Поскольку более быстро движущийся газ сталкивается с расположенным перед ним газом, который движется медленнее, плотность газа на ведущем крае быстро увеличивается (b). На ведомом крае возникает область разрежения. Когда плотность растет, давление газа также увеличивается, уменьшаясь затем в ведомой части волны (c).

Волны скорости солнечного ветра становятся круче с увеличением расстояния от Солнца подобно тому, как становятся круче океанские волны, когда они приближаются к песчаному берегу (рис. 2). Имеются, конечно, отличия между волнами на воде и волнами в солнечном ветре. Во-первых, вода несжимаема, а солнечный ветер легко сжимается. Во-вторых, волны в воде переносят энергию и импульс, но не массу, тогда как

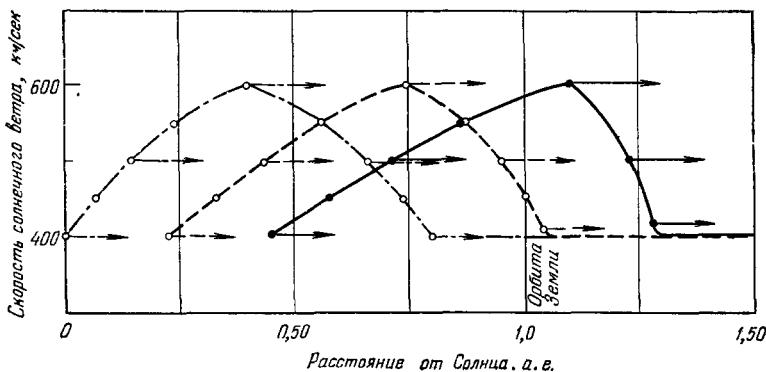


Рис. 2. Волны скорости солнечного ветра становятся круче, когда они движутся от Солнца, подобно тому, как становятся круче океанские волны по мере приближения к песчаному берегу.

Гребень волны движется быстрее, чем впадина, и постепенно догоняет ее. На этой суперпозиции трех последовательных мгновенных снимков идеализированной волны скорости солнечного ветра, сделанных через день, можно легко видеть, как отдельные частицы, или малые объемы, газа (кружки) на ведущем крае волны сжимаются в область высокой плотности, тогда как частицы на ведомом крае расходятся в области низкой плотности.

солнечный ветер переносит энергию, импульс и массу от Солнца к внешним границам Солнечной системы. Несмотря на эти различия, аналогия, однако, является достаточно близкой.

В случае океанских волн скорость волн на мелкой воде пропорциональна квадратному корню из толщины слоя воды. Поэтому гребни океанских волн, приближающихся к песчаному берегу, перемещаются быстрее, чем впадины, которые соответствуют меньшей толщине слоя воды, и волны становятся круче. В конечном итоге океанские волны, бегущие к песчаному берегу, становятся столь крутыми, что гребни буквально обгоняют впадины. В этот момент волны опрокидываются и разрушаются. Что происходит в солнечном ветре, когда на больших расстояниях от Солнца гребень волны скорости начинает опережать впадину? Иными словами, что является аналогом «накрывающей волны» в межпланетном пространстве?

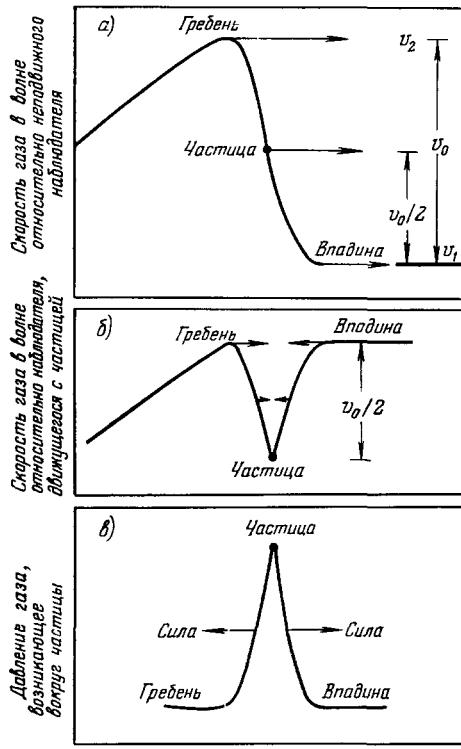
□

Рассмотрим более детально поведение одной частицы газа *) на середине ведущего края волны скорости солнечного ветра, которая имеет амплитуду v_0 (рис. 3). Газ во впадине перед волной движется медленнее, чем эта частица газа, и таким образом, эта частица догоняет его. В то же время газ на гребне волны догоняет частицу. Наблюдатель, движущийся вместе с этой частицей, видел бы газ, текущий к нему как в направлении от Солнца (более быстро движущийся газ на гребне волны), так и обратно,

*) Разумеется, в гидродинамическом смысле, т. е. имеется в виду некоторая масса, порция газа или, как часто говорят, жидкая частица. (Примеч. пер.)

т. е. по направлению к Солнцу (более медленно движущийся газ во впадине), со скоростями вплоть до максимального значения $v_0/2$. Однако в избранную частицу газ при этом не втекает, поскольку слабое магнитное поле, «вмороженное» в солнечный ветер, препятствует взаимному проникновению различных порций газа. Следовательно, в газе, окружающем частицу, возникает давление, и оно оказывает сопротивление втеканию с обеих сторон. Для наблюдателя, движущегося с частицей, газ, приходящий с обеих сторон, замедляется, сжимается и нагревается, когда он сталкивается с областью высокого давления. Для неподвижного наблюдателя, следящего за волной солнечного ветра из фиксированной точки пространства, замедление газа, приходящего из обоих направлений, выглядит как замедление высокоскоростного газа вблизи гребня волны и ускорение газа с малой скоростью вблизи впадины. В результате импульс и энергия передаются от быстро движущегося газа на гребне к медленно движущемуся газу во впадине.

Именно в этом месте становится существенной сверхзвуковая природа солнечного ветра. Скорость звука s представляет собой характерную скорость, с которой распространяются в газе изменения (возмущения) давления малой амплитуды. Таким образом, когда волна солнечного ветра становится круче, область высокого давления расширяется в газе передней и позади нее со скоростью звука. Если газ во впадине впереди области высокого давления чувствует смену давления, он будет ускоряться за счет скорости газа на гребне. Действительно, до тех пор, пока максимальная скорость волны такова, что скорость сближения различных частей газа ($v_0/2$) меньше, чем скорость звука s , изменения давления будут всегда ощущаться всеми частицами газа как во впадине волны, так и на ее гребне, прежде чем этот гребень догонит впадину. Таким образом, до тех пор, пока величина $s - (v_0/2)$ больше нуля, волна солнечного ветра будет плавно затухать.



Увеличивающееся расстояние от Солнца

Рис. 3. Нарастание крутизны волны склонности солнечного ветра ограничено ростом давления на ведущем крае волны.

На рис. а) показана развитая волна амплитуды v_0 , где v_0 равна разности скоростей на гребне волны v_2 и во впадине v_1 . Частица газа на середине ведущего края волны движется со скоростью $v_0/2$ относительно впадины. Наблюдатель, движущийся вместе с этой частицей, видел бы газ, текущий к ней как со стороны более быстро движущегося газа на гребне волны, так и со стороны медленнее движущегося газа во впадине, со скоростью вплоть до максимального значения $v_0/2$ (б). Накапливающийся газ вызывает рост давления вокруг частицы, которое оказывает сопротивление притоку газа с обеих сторон (с). Неподвижный наблюдатель, следящий за волной из фиксированной точки пространства, заметил бы, что медленный газ во впадине ускоряется, а быстрый газ на гребне волны, наоборот, замедляется. Если скорость газа, движущегося к центральной частице, $v_0/2$, большие скорости звука, то по обе стороны от области высокого давления образуются две ударные волны, одна из которых распространяется назад к гребню, а другая вперед к впадине. Ударные волны предохраняют волну от опрокидывания и разрушения, как в случае океанских волн.

Что произойдет, если волна в солнечном ветре имеет столь большую амплитуду, что скорость стекания газа к рассматриваемой частице больше, чем скорость звука? В этом случае область высокого давления, которая стремится расширяться в обоих направлениях со скоростью звука, не может это сделать достаточно быстро, чтобы предупредить газ во впадине впереди себя (и на гребне волны позади) о неминуемом прибытии волн. Вместо этого происходит следующее. Давление в волне в месте частицы газа нарастает очень быстро; волна продолжает становиться круче столь быстро, что формируются две ударных волны, по одной с каждой стороны области высокого давления. Одна из ударных волн распространяется назад от центральной области высокого давления к гребню волны, другая — вперед к впадине. Ударные волны — это волны давления большой амплитуды, в которых давление, плотность и скорость потока изменяются скачком. Они распространяются по газу быстрее, чем звук. Фактически скорость, с которой обе ударные волны распространяются по солнечному ветру, точно определяется величиной прироста давления в волне солнечного ветра, и эта скорость как раз такова, что удерживает волну от опрокидывания и разрушения.

Хотя одна из двух ударных волн распространяется назад от области максимального давления, неподвижный наблюдатель видел бы реально, что обе ударные волны несутся наружу от Солнца с огромной скоростью. Причина в том, что солнечный ветер — это сверхзвуковой поток, скорость которого еще больше, чем скорость ударной волны, распространяющейся назад. Скорость звука в солнечном ветре уменьшается с увеличением расстояния от Солнца и соответствующим падением температуры ветра. Поэтому фактически все волны в солнечном ветре должны в конечном итоге становиться достаточно крутыми, чтобы породить пару ударных волн.

□

Были развиты некоторые количественные модели, описывающие процесс увеличения крутизны волны в солнечном ветре. Один из авторов (Хундхаузен) предложил одномерную количественную модель, которая пренебрегает некоторыми физическими эффектами, вероятно, присутствующими в солнечном ветре, и все же неплохо описывает эволюцию волн. Такие модели оказались ценными для интерпретации наблюдений потоков солнечного ветра вблизи Земли; они также предложили привлекательные объяснения того, почему изменения скорости, плотности и давления газа в таких потоках связаны между собой.

Потоки солнечного ветра наблюдались почти без исключения в одной точке космического пространства, а именно, вблизи Земли. Соответственно до недавнего времени не было возможности непосредственно обнаружить увеличение крутизны волн в солнечном ветре, поскольку для этого требуются измерения в двух достаточно разнесенных от Солнца точках. При помощи измерений, полученных вблизи Земли, об увеличении крутизны волн скорости можно судить только по сопутствующим изменениям в солнечном ветре. Более того, почти все потоки солнечного ветра, наблюдавшиеся вблизи Земли, не имеют структуры двух ударных волн, поскольку волны скорости еще не успевают стать достаточно крутыми для формирования таких ударных волн. Действительно, модели предсказывают, что фактически во всех потоках солнечного ветра должны быть ударные волны лишь при расстояниях в две или три астрономические единицы от Солнца. (Одна астрономическая единица (а.е) — среднее расстояние от Солнца до Земли.) Далее, модели предсказывают, что по мере приближения к внешним границам Солнечной системы, амплитуда всех волн должна уменьшаться очень медленно.

С запуском космических кораблей «Пионер-10» в 1972 г. и «Пионер-11» в 1973 г., каждый из которых прошел мимо Юпитера, т. е. на расстоянии около пяти астрономических единиц от Солнца, впервые стало возможным непосредственно проверить общее представление (и конкретные модели) эволюции волн скорости в солнечном ветре. Первыми данными, полученными при помощи плазменного зонда (созданного в Исследовательском центре в Эймосе и установленного на «Пионере-10»), когда Пионер-10

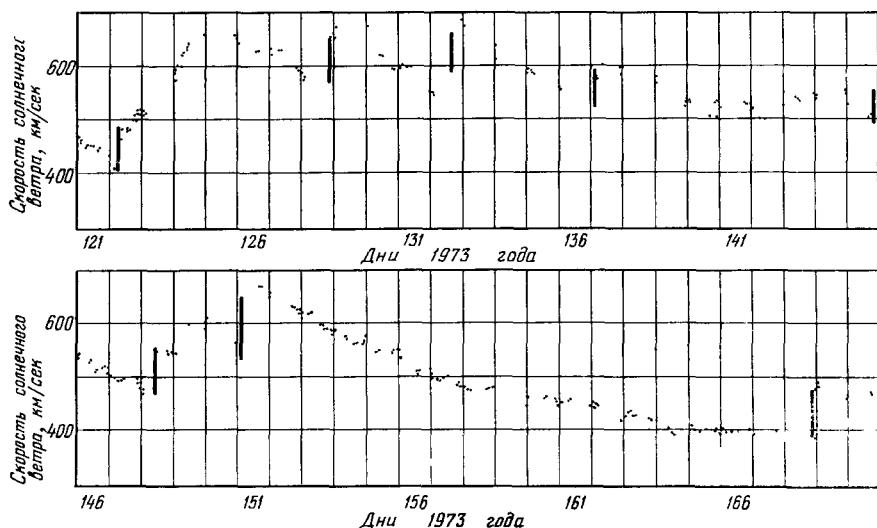


Рис. 4. Скорость солнечного ветра вблизи Юпитера, измеренная космическим кораблем «Пионер-10» ежечасно в течение 50-дневного периода в мае и июне 1973 г.

За это время космический корабль прошел расстояние от 4,03 до 4,23 а.е. На этом расстоянии от Солнца фактически все волны солнечного ветра, имеющие большую амплитуду, стаги такими крутыми, что приносят форму зубьев пильы. Резкие скачки скорости на возрастающих частях каждой волны скорости — ударные волны, их положение указано на рисунке вертикальными линиями.

пересекал межпланетное пространство, были ежечасные значения скорости ветра (рис. 4). Из этих данных стало ясно, что за орбитой Земли каждый существенный поток в солнечном ветре проявляется как быстрое нарастание скорости, за которым следует более медленный спад. Кроме того, на переднем фронте волн происходит резкое увеличение скорости с временным масштабом около часа, чего можно было бы ожидать при наличии ударных волн. Характерное поведение с быстрым ростом и медленным спадом скорости обнаруживается в широком диапазоне амплитуд и периодов; оно в точности соответствует пилообразному характеру, ожидаемому для эволюционирующих волн скорости. В отсутствие измерений плотности, давления и магнитного поля в солнечном ветре нет возможности убедительно продемонстрировать, что резкие скачки скорости ветра на переднем фронте потоков в данных «Пионера-10» были ударными волнами. Однако данные о скорости солнечного ветра согласуются с такой интерпретацией; результаты более поздних измерений «Пионером-10» вариаций в межпланетном магнитном поле подтвердили этот вывод.



Траектория «Пионера-10» между Землей и Юпитером была такой, что в августе и сентябре 1973 г. космический корабль находился почти на прямой линии с Солнцем и Землей. Этот двухмесячный период дал прекрасную возможность для прямого наблюдения увеличения крутизны

воли скорости между двумя точками, далеко разнесенными вдоль общей линии, простирающейся почти радиально от Солнца. Рис. 5 показывает последовательность измерений скорости солнечного ветра, полученных при помощи плазменного зонда Лос-Аламосской исследовательской лаборатории на спутнике IMP-7 (седьмая межпланетная мониторная платформа) на орбите вокруг Земли. На этом же рисунке представлена и другая

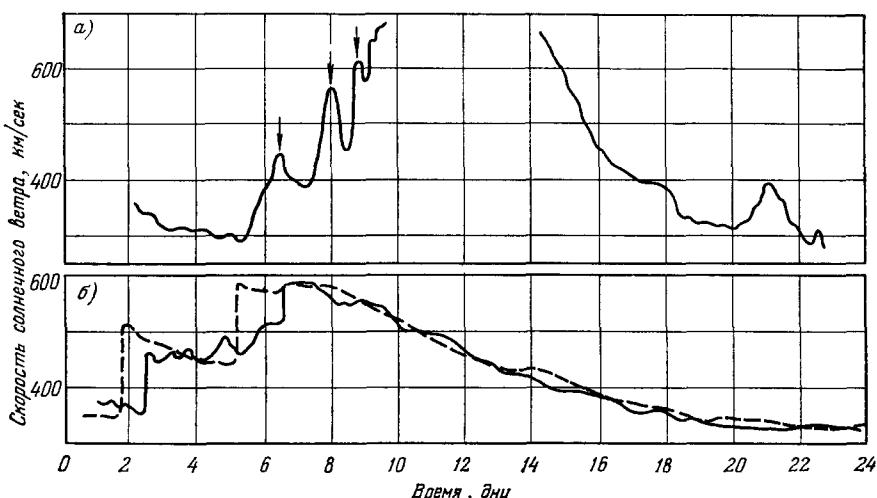


Рис. 5. Развитие волны солнечного ветра при распространении на 4,7 а. е. по радиусу от Солнца в направлении к Земле было предсказано, исходя из формы волны, наблюденной около Земли в августе и сентябре 1973 г.

Эти наблюдения (а) были выполнены приборами на спутнике Земли IMP-7 (седьмая межпланетная мониторная платформа). Временное отсутствие данных связано с прохождением спутника через земную магнитосферу, где солнечный ветер, разумеется, не может быть измерен. По наблюдениям с помощью теоретической модели была предсказана форма волны на расстоянии 4,7 а. е. от Солнца (штриховая кривая на рис. б). Измерения волны, выполненные на «Пионере-10» (сплошная кривая на нижнем рисунке), показывают, что волна стала круче и на ее ведущем крае сформировались две ударные волны. Эта картина была предсказана достаточно хорошо. Полная амплитуда волны на расстоянии 4,7 а. е. заметно меньше, чем она была на 1 а. е. Кроме того, большие короткопериодические флюктуации (показаны стрелками) скорости солнечного ветра на растущей части волны, имеющиеся вблизи Земли, затухли. Этот факт тоже достаточно хорошо предсказывается моделью.

последовательность измерений, которые выполнены «Пионером-10» на 17,5 дней позднее на расстоянии 4,7 а. е. от Солнца. Два набора данных сдвинуты друг относительно друга таким образом, чтобы ведущий край волны, измеряемой каждым космическим кораблем, совпадал, если бы газ в ведущем крае волны распространялся от IMP-7 до «Пионера-10» с постоянной скоростью.

Можно видеть, что фактически ведущие края волн в двух наборах данных не совпадают: «Пионер-10» детектировал начало волны приблизительно на три дня раньше. Волна пришла раньше потому, что высокоскоростной газ на гребне волны увлек более медленно движущийся газ впереди него и ускорил этот газ, как и предполагалось. Кроме того, на расстоянии 4,7 а. е. от Солнца волна стала более пилообразной, чем вблизи Земли, а около ведущего края появились резкие увеличения скорости, которые не были очевидны, когда волна проходила мимо Земли. Измерения волны на «Пионере-10» показали, что волна действительно имела профиль, который следовало бы ожидать, если бы она стала круче и при этом образовалась пара ударных волн, ограничивающих область сжатия на ее ведущем крае.

Совпадение результатов модели с наблюдениями становится еще более разительным, если независимо использовать измерения на IMP-7

скорости, плотности и давления в солнечном ветре вблизи Земли для того, чтобы предсказать при помощи одномерной модели структуру волны у «Пионера-10». Согласие между предсказываемой и наблюдаемой формами волны идеально хорошее, особенно для формы всей волны, амплитуды изменения скорости газа и времени, когда волна достигает «Пионера-10». Не столь хорошо модель предсказывает амплитуду резких увеличений скорости на фронтах ударных волн. Не вдаваясь в детали модели, можно сказать, что ее слабые места связаны с упрощающими предположениями, которые пришлось принять, чтобы сделать ее доступной для численных расчетов на вычислительной машине. В частности, модель пренебрегает эффектами магнитных сил, теплопроводности и тем фактом, что область высокого давления в волне солнечного ветра заставляет поток газа становиться в конечном итоге нерадиальным.

□

До сих пор мы рассматривали эволюцию волн в солнечном ветре лишь при одной фиксированной гелиоцентрической долготе: линии от Солнца

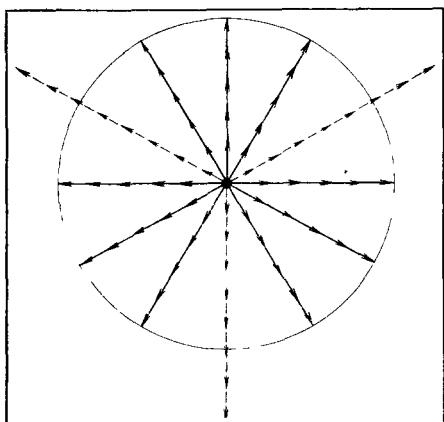


Рис. 6. Линии тока прослеживают траектории всех частиц газа (стрелки), имеющие общее начало в одной области Солнца.

Сплошные стрелки показывают газ, движущийся со скоростью 350 км/сек, штриховые — 500 км/сек. Окружность указывает орбиту Земли. Солнечный ветер движется почти радиально от Солнца. Если бы, как это показано на рисунке, Солнце не вращалось, линии тока были бы прямыми.

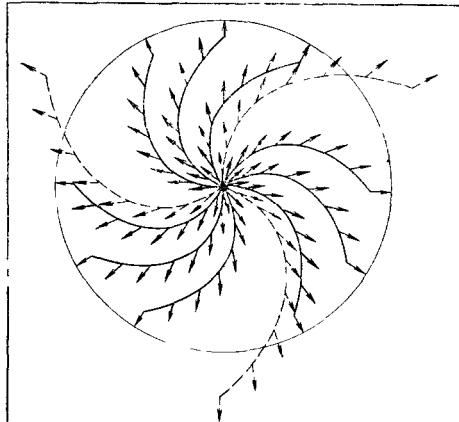


Рис. 7. Линии тока солнечного ветра искривлены в системе координат, связанный с Солнцем: вращение Солнца закручивает линии тока в спирали.

Кривизна каждой линии тока зависит от скорости газа, движущегося от Солнца. Там, где линии тока сходятся, газ скимается и образует поток солнечного ветра; линии тока расходятся в местах разрежения газа.

к Земле. Однако эволюция волны вдоль любой долготы является лишь малой частью много большего волнового движения, которое охватывает всю Солнечную систему. Это волновое движение может быть лучше всего показано при помощи линий тока — воображаемых линий, которые прослеживают траектории всех частиц газа, начинающиеся на Солнце, в общей точке, но в различные моменты времени. Если бы Солнце не вращалось, линии тока были бы прямыми, радиально уходящими от Солнца (рис. 6). Вращение Солнца вызывает закручивание линий тока в спирали в экваториальной плоскости (рис. 7). Чем медленнее распространяются частицы газа, тем более туго закручиваются спиральные линии тока. Узкие ленты сжатия (высокой плотности) образуются в областях, где линии тока сходятся; широкие области разрежения (низкой плотности) там, где линии

тока расходятся. Когда испускание газа от Солнца является постоянным во времени, вся картина искривленных линий тока вращается вместе с Солнцем. Стоит подчеркнуть, что вращается только картина линий тока: каждая частица газа в солнечном ветре движется наружу почти радиально.

Из данных о солнечном ветре, полученных в 1973 г. на спутнике IMP-7 и космическом корабле «Пионер-10», а также с помощью теоретической модели можно вывести общую картину солнечного ветра в плоскости земной орбиты, такую, какой эта картина могла бы казаться

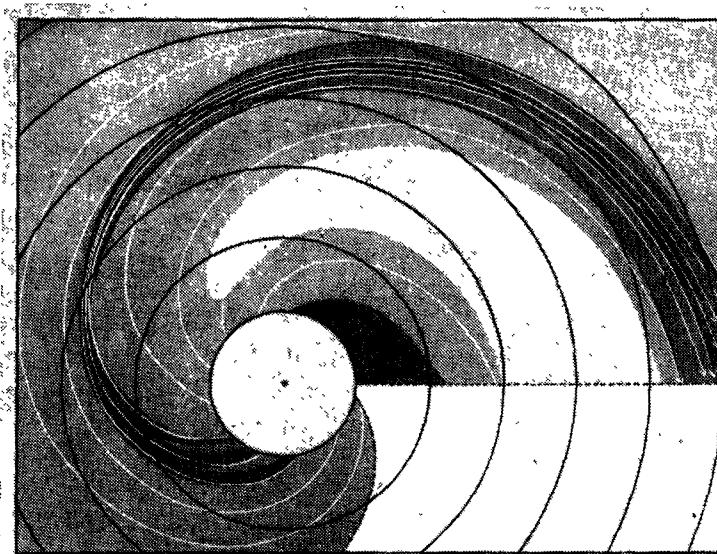


Рис. 8. Поток солнечного ветра в плоскости земной орбиты в августе и сентябре 1973 г. Таким он может быть воспроизведен на основании теории и наблюдений со спутника IMP-7 и космического корабля «Пионер-10». Окружностями показано расстояние от Солнца в астрономических единицах от 1 до 6. Контуры плотности солнечного ветра представлены различными оттенками света, каждый контур отличается от следующего на множитель 4 (контуры принимают во внимание факт падения плотности газа с расстоянием от Солнца). Тонкие светлые стрелки показывают линии тока. Темные сплошные кривые соответствуют ударным волнам. Хотя характер течения газа внутри орбиты Земли неизвестен, можно видеть, что через орбиту Земли проходят три области сжатия, связанные с короткопериодическими флуктуациями скорости, имеющими большую амплитуду, на ведущем крае главной волны.

неподвижному наблюдателю, находящемуся высоко над северным полюсом Солнца (рис. 8). Поток был наиболее сжатым на расстоянии около трех астрономических единиц от Солнца. В этом месте область сжатия содержала все линии тока, которые первоначально находились на ведущем крае волны. На расстояниях больших, чем три астрономические единицы, область сжатия медленно расширялась. Расширение ускорилось, когда в результате роста крутизны волны, распространяющейся от центра сжатия, образовалась пара (прямая и обратная) *) ударных волн. Вблизи орбиты Юпитера линии тока, которые первоначально были разнесены по солнечной долготе более чем на 180° , оказались внутри области сжатия, ограниченной ударными волнами. Широкая область разрежения занимала остальную часть пространства.

*) Перевернутая по отношению к неподвижному наблюдателю ударная волна. (Примеч. пер.)

□

Таким образом, складывается впечатление, что концепция волны скорости с нарастающей крутизной объясняет наблюдаемые изменения в структуре солнечного ветра на расстояниях от одной до примерно пяти

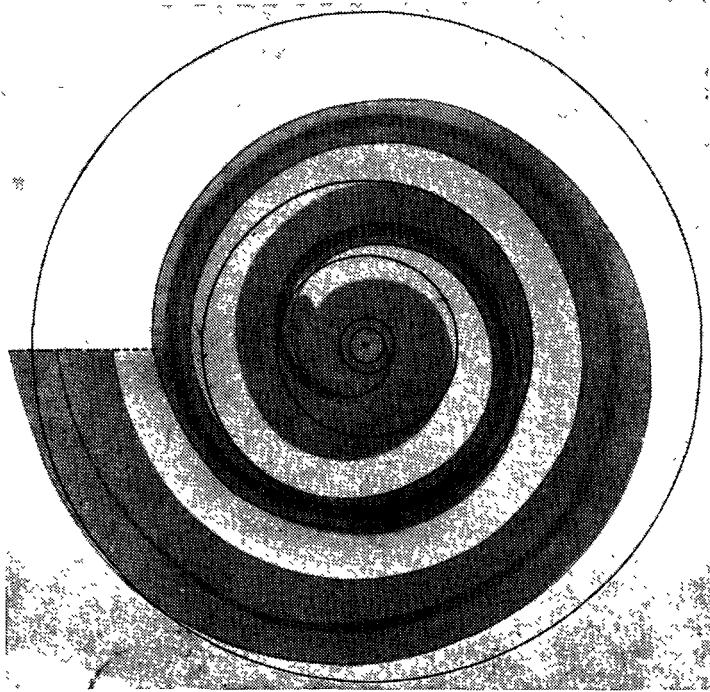


Рис. 9. Поток солнечного ветра (широкая полоса) расширяется наружу от Солнца (темная точка), закручиваясь вращением Солнца в структуру, напоминающую спираль.

Такой поток можно рассматривать как волну в солнечном ветре, возникающую, когда расширяющийся газ из одной области солнечной короны, или внешней атмосферы, движется быстрее, чем газ из других областей. На любой заданной длине в космическом пространстве более быстрый газ волн будет догонять более медленный газ впереди него и одновременно убегать от более медленного газа позади него. Поэтому газ на ведущем крае волн будет сжиматься (указана темная лента), а газ на ведомом крае будет разрежаться (светлая лента). На расстоянии около трех астрономических единиц эта волна солнечного ветра порождает две ударные волны (темные линии), которые расходятся из области наибольшего сжатия. Сама волна расширяется по мере удаления от Солнца, и ее амплитуда, разность между скоростями самого быстрого и самого медленного газа, становится меньше. На рисунке развитие волн прослежено до радиуса в 20 астрономических единиц: концентрические сплошные окружности показывают орбиты Земли (1 а. е. от Солнца), Марса; (1,5 а. е.), Юпитера (5,2 а. е.), Сатурна (9,5 а. е.) и Урана (19,2 а. е.). В масштабе рисунка невозможно изобразить эволюцию волн внутри орбиты Земли. Если продолжить волну солнечного ветра на расстояния больше 20 а. е. еще на один оборот, то ударная волна на ведомом крае следующего витка спирали (на рисунке не показан) пересечет ударную волну на ведущем крае самого внешнего витка спирали, показанной на рисунке.

астрономических единиц. Эта структура может быть теоретически продолжена на еще большие расстояния в пределах Солнечной системы (рис. 9). Предполагается, что волны скорости продолжают эволюционировать подобным же образом вплоть до 20 астрономических единиц, где спиральная структура начнет замыкаться назад сама на себя; на этом расстоянии ударная волна на ведомом крае потока на следующем витке спирали будет сталкиваться с идущей вперед ударной волной на ведущем крае витка, содержащегося внутри. После этого и вплоть до некоторого неизвестного расстояния эволюция волн скорости солнечного ветра будет продолжать увеличивать неоднородность солнечного ветра. Например,

на расстоянии 20 астрономических единиц относительная разность между плотностью газа в области сжатия и плотностью в области разрежения больше, чем на орбите Земли.

Недавно было показано, что ударные волны, которые формируются при увеличении крутизны волн в солнечном ветре за орбитой Марса, порождают большое количество космических лучей в виде протонов малых энергий (от 1 до 50 МэВ). Фактически, возможно, что почти весь поток низкоэнергичных протонов, детектируемых у Земли, создается такими ударными волнами и модулируется магнитными полями, связанными с потоками солнечного ветра на больших расстояниях от Солнца. Более того, недавние наблюдения показывают, что Юпитер действует аналогично электронной пушке, ускоряющей электроны до энергий в диапазоне от 1 до 10 МэВ. Электроны заполняют межпланетное пространство; их распространение через солнечный ветер, однако, подвержено сильному влиянию пар (прямой и обратной) ударных волн, которые образуют барьер, непроницаемый для электронов.

Изучение ускорения и распространения энергичных частиц в межпланетном пространстве — лишь одна область исследований, для которых является важным знание волн в солнечном ветре. В самом деле, очень развитая структура потоков солнечного ветра на больших расстояниях от Солнца, по-видимому, будет иметь важное значение при изучении широкого круга проблем, начиная с динамики магнитосфер внешних планет и кончая взаимодействием солнечного ветра с межзвездным газом.

ЛИТЕРАТУРА

- E. N. Parker, *Scientific American* 210 (4), 66 (April 1964) (имеется перевод: УФН 84, 169 (1964)).
- J. C. Grandt, *Introduction to the Solar Wind*, San Francisco, W. H. Freeman and Comp., 1970 (имеется перевод: Дж. К. Грант, *Солнечный ветер. Введение в проблему*, М., «Мир», 1973).
- A. J. Hundhausen, *Coronal Expansion and Solar Wind*, Berlin-Heidelberg-New York, Springer-Verlag, 1972 (имеется перевод: А. Хундхаузен, *Расширение короны и солнечный ветер*, М., «Мир», 1976).
- J. T. Gosling, A. J. Hundhausen, S. J. Bame, *J. Geophys. Res.* 81 (13), 2111 (May 1976).