

ПРИРОДА

№ 10 - 1999 г.

Б.П. Филиппов

Кусочки Солнца «НАВЫНОС»

© Природа

*Использование или распространение этого материала
в коммерческих целях
возможно лишь с разрешения редакции*



Образовательный сетевой выпуск
VIVOS VOCO! - ЗОВУ ЖИВЫХ!
<http://www.accessnet.ru/vivovoco>

Кусочки Солнца «навынос»

Б. П. Филиппов

Борис Петрович Филиппов, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией солнечной активности Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН. Научные интересы связаны с исследованием механизмов нестационарных процессов в атмосфере Солнца. Публиковался в «Природе».

13 МАРТА 1989 г. в середине ночи на главном контрольном пульте Квебекской гидроэлектрической компании в Монреале внезапно замигала сигнальная лампочка: возникли неполадки на одной из главных линий электропередач от гидростанции на реке Ла Гранд (север провинции Квебек) к Монреалу. Автоматический регулятор отключил линию из-за внезапной перегрузки, а вслед за этим — один за другим остальные генераторы компании. Волна отключений прокатилась по всей энергосистеме. Изумленный персонал лишь беспомощно взирал на пульт, где множество лампочек мигали, как на новогодней елке. Меньше чем за полторы минуты огромная провинция с шестимиллионным населением погрузилась во мрак. Причина была не в неумелых действиях диспетчеров и не в ошибках проекта системы. Причиной было... Солнце.

Современные энергосистемы чрезвычайно протяженны и запутанны. Они охватывают своими сетями целые континенты. Внезапные вариации магнитного поля Земли, называемые геомагнитными бурями, индуцируют в длинных линиях электропередач сильные дополнительные токи, которые выводят из строя оборудование подстанций. Причина же магнитных бурь — во взаимодействии земной магнитосферы с облаками замагниченной плазмы, выбрасываемой Солнцем в межпланетное пространство. Частицы высоких энергий этой плазмы воздействуют на электронные устройства космических аппаратов, иногда полностью парализуя их работу. По этой причине 26 ноября 1982 г. прекратили действовать радиометры на спутнике «GEOS-4», а 21 января 1994 г. перестали функционировать два канадских спутника связи.

Таким образом, солнечные «плевок» далеко не безобидны для жителей Земли, и следовало бы с ними разбираться. Раз уж увернуться у нас возможности нет, то по крайней мере хорошо бы знать, когда их можно ожидать, чтобы вовремя принять необходимые меры предосторожности, как-то «прикрыться».

В КОЛЫБЕЛИ МАГНИТНЫХ БУРЬ

Звезды в обыденных человеческих масштабах — неизменные, неподвижные, вечные. Наша ближайшая родная

звезда — Солнце — тоже светит стабильно и ровно, к нашему общему, как говорится, удовольствию. Мерно гудит в его недрах термоядерная печь, и долгие миллионы лет пробиваются фотоны к поверхности светила, чтобы потом стремительно унести в межзвездную черноту. Приповерхностные слои Солнца, подогреваемые изнутри, немного бурлят, но эта спокойная стационарная конвекция вносит лишь небольшую рябь, проявляясь в ячеистой, грануляционной, структуре излучающей поверхности Солнца — фотосферы. Конвекция, впрочем, только одна из «составных частей» дей-

ствующей в недрах Солнца гигантской динамомшины, которая преобразует монотонную жизнь звезды, вырабатывая удивительную переменчивую субстанцию — магнитное поле.

В отличие от Земли, где магнитное поле, несмотря на случающиеся бури, довольно регулярно и поэтому стабильно и исправно служит целям навигации, магнитное поле Солнца сплошь состоит из аномалий, которые к тому же короткоживущи и изменчивы. Эти аномалии, называемые активными областями, сосредоточены в основном в зоне тропических, по земным меркам, гелиофизических широт, причем каждые 11 лет они начинают появляться сначала на широтах около 40° , а затем их рождение происходит все ближе и ближе к экватору. Хорошо развитые активные области содержат пятна — относительно темные участки фотосферы, где сконцентрированы наиболее сильные магнитные поля (до 4 кГс). Генерация магнитного поля происходит глубоко под фотосферой, но долго находится там силовые трубки не могут. Вследствие участия магнитного давления в общем гидростатическом равновесии плазма внутри магнитной трубки с сильным полем менее плотная и подвержена воздействию архимедовой силы (так называемая магнитная плавучесть). Поднявшись в верхние слои атмосферы Солнца — хромосферу и корону, магнитные поля служат источником энергии для внезапных и бурных процессов, связанных с перестройкой поля.

Если наблюдать Солнце в монохроматическом свете, например — линии водорода H_α , первое, что бросается в глаза, — это прилепившиеся к правильному круглому диску довольно аморфные выступы — протуберанцы. Часто продолжение выступа тянется по диску в виде узкой темной полосы — волокна. Протуберанцы представляют собой облака сравнительно холодной плотной плазмы (параметры которой близки к хромосферным), находящиеся в короне, в сотни раз более горячей и более разреженной. Высота протуберанцев над хромосферой обычно составля-

ет около 30 тыс. км или $\sim 0.2 R_\odot$. Спокойные протуберанцы — относительно устойчивые структуры, которые сохраняются в течение многих месяцев.

В отличие от земных облаков, свободно парящих в атмосфере, протуберанцы гораздо тяжелее окружающей среды и должны были бы упасть, если бы их не поддерживала иная, не гидростатическая, сила. Наиболее вероятный кандидат — электродинамическая сила. Высокопроводящая плазма протуберанца может покоиться в «гаммаке» магнитных силовых линий, препятствующих стеканию вещества в хромосферу. Впервые такую модель равновесия протуберанцев предложил Д. Мензел¹ в 1951 г., а Р. Киппенхан и А. Шлютер² в 1957 г. разработали модель, на многие годы ставшую классической и общепризнанной, несмотря на очевидные противоречия, которые она не в силах разрешить. Главное из них в том, что для устойчивого равновесия силовые линии, выходящие в корону из фотосферы и вновь в нее возвращающиеся, должны вблизи протуберанца быть вогнутыми, а не выпуклыми, т.е. создавать удобный «гаммак», а не скользкий «бугор». Представить себе подобное поле можно, но трудно ожидать, что такие хитрые конструкции встречаются на Солнце столь же часто, как и волокна.

Время от времени отдельные протуберанцы вдруг теряют равновесие, ускоренно поднимаются вверх и уносятся прочь от Солнца. Такие протуберанцы называют эруптивными. Эрупции (извержения) начинаются внезапно, без какого-либо заметного внешнего воздействия. Очень быстро протуберанец приобретает скорость в сотни километров в секунду. Часть вещества, разогнавшись до скорости убегания (~ 600 км/с), уже не возвращается на Солнце. Фотосферные же магнитные поля не обнаруживают в это время значительных и быстрых изменений. Трудно по-

¹ Menzel D.H. // Proc. Conf. of Dynamics of Ionised Media. London, 1951.
² Kippenhahn R., Schluter A. // Zeitschr. Astrophys. 1957. Bd.43. S.36–62.

нять, как можно «вытряхнуть» протуберанец из «гамака», не «встрянув» его как следует за края.

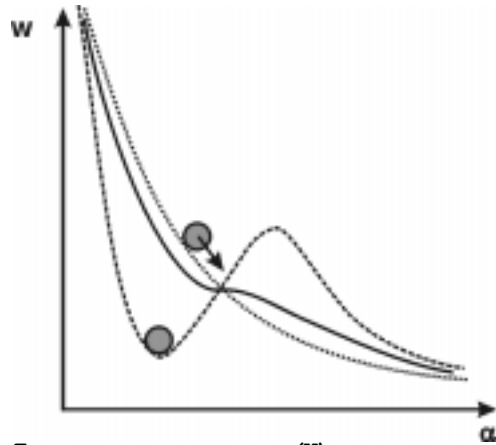
Альтернативную модель равновесия протуберанцев предложили в 1974 г. М.Куперус и М.Рааду³. Они предположили, что вдоль волокна течет сильный электрический ток, и учли, что этот ток должен отталкиваться от поверхности высокопроводящей фотосферы. Протуберанец как бы лежит на магнитной подушке, создаваемой собственным током. На основе развития этой модели удалось понять, почему волокна взлетают как бы сами по себе.

«КАТАСТРОФЫ В ОБЛАКАХ»

Если в высокую банку, стоящую немного наклонно, по каплям наливать воду, устойчивость ее равновесия будет падать по мере повышения уровня воды. Когда линия отвеса из центра тяжести приблизится к краю доньшка, равновесие станет неустойчивым и после очередной маленькой капли банка опроки-



Стоящая на наклонной плоскости и наполняющаяся водой банка — пример системы, в которой может развиваться катастрофический процесс.



Потенциальная энергия (W) системы, изображенной на рис.2, при трех различных уровнях воды в банке. Глубина потенциальной ямы уменьшается при приближении вертикальной проекции центра тяжести к краю доньшка.

нется и вода из нее выльется наружу. Произойдет «катастрофа». С математической точки зрения система обладает значительной нелинейностью и малые изменения параметров приводят к большим изменениям ее состояния. Кривая зависимости потенциальной энергии от наклона банки имеет ямку до тех пор, пока вертикальная проекция центра тяжести находится в пределах доньшка. При приближении к краю глубина ямки уменьшается, и остается лишь небольшой уступчик, который сглаживается при выходе точки проекции за пределы основания.

Примерно так, вероятно, развиваются эрупции протуберанцев. Только все поставлено «с ног на голову» и кончается не падением, а взлетом последнего. Магнитное поле, источники которого расположены под поверхностью фотосферы, в модели Куперуса–Рааду не поддерживает ток волокна, а наоборот, стремится прижать его к фотосфере. Но высокая проводимость и инерционность плотной фотосферы не позволяют магнитному полю волокна проникнуть под ее поверхность. В результате возникают поверхностные индукционные токи, поле которых в короне эквивалентно полю

³ Kuperus M., Raadu M.A. // Astron. Astrophys. 1974. V.31. P.189–193.



Конфигурация магнитных силовых линий в окрестностях волокна в моделях Киппенхана–Шлютера (слева) и Куперуса–Рааду.

зеркального отражения тока волокна, только с противоположным направлением. Равновесие с силой отталкивания от индуцированных токов устойчиво, если внешнее поле убывает с высотой медленнее, чем поле зеркального тока. Смещение волокна вверх приводит в этом случае к большему уменьшению силы отталкивания и, следовательно, к возникновению результирующей силы, направленной вниз, к положению равновесия. Смещение вниз в большей степени усиливает отталкивание, что вновь дает возвращающую силу.

В ходе эволюции волокна ток в нем может меняться по различным причинам. Чем больше ток, протекающий в волокне, тем выше положение равновесия над фотосферой. Из-за большой величины одного из линейных размеров — длины (а отдельные волокна тянутся почти через весь видимый диск Солнца) магнитное поле волокна убывает довольно медленно, обратно пропорционально удалению от него $\sim 1/r$. Масштаб неоднородностей фонового поля бывает меньшим, он определяется размером конвективных ячеек, выносящих поле на поверхность. На некоторой высоте фоновое поле начинает уменьшаться быстрее, чем $1/r$, и равновесие перестает быть устойчивым. Потеря равновесия может происходить вследствие медленного, плавного роста тока волокна или изменений фонового поля, но динамика волокна после начала катастрофического процесса уже не определяется этими изменениями, а зависит от свойств системы. В частности,

магнитные силы притяжения и отталкивания могут на несколько порядков величины превосходить гравитационную силу. После потери равновесия даже небольшой дисбаланс магнитных сил вызовет очень бурную эрупцию волокна. Ускорение волокна может во много раз превосходить ускорение свободного падения у поверхности Солнца⁴ ($\sim 270 \text{ м/с}^2$).

Обычный сценарий развития явления таков: средняя часть волокна внезапно начинает подниматься вверх, тогда как концы его остаются неподвижными. На диске Солнца это хорошо заметно по доплеровским смещениям профиля линии, в которой ведется наблюдение. Волокно, расположенное вблизи края диска, очень скоро поднимается над лимбом ярким протуберанцем, имеющим форму неровной арки. При хорошем пространственном разрешении часто можно видеть, что у арки есть тонкая структура из отдельных нитей или прядей, закрученных в жгут, как в канате. Если, как обычно, плазменные неоднородности вытягиваются вдоль магнитного поля, то это свидетельствует о протекании электрического тока вдоль оси волокна. Концы арки остаются «укорененными» на Солнце, что, вероятно, говорит о замыкании тока в нижних плотных слоях атмосферы. Из-за растягивания арки и увеличения ее поперечного сечения плотность вещества в ней по-

⁴ Молоденский М.М., Филиппов Б.П. Магнитные поля активных областей Солнца. М., 1992.

Фрагмент изображения Солнца, полученного 14 сентября 1997 г. ультрафиолетовым телескопом спутника SOHO в линии ионизованного гелия с эруптивным протуберанцем над лимбом.

Корональный выброс вещества, зарегистрированный внезатменным коронографом спутника SOHO 2 июня 1998 г. Слева внизу – обычный корональный стример, не меняющий своего вида в течение многих дней. Справа внизу – динамичный выброс, центральная яркая петля которого представляет собой остатки взорвавшегося волокна.

стоянно уменьшается. Кроме того, часть вещества, особенно на поздней стадии эрупции, стекает вниз вдоль «привязань» к поверхности концов арки. Вследствие этих причин яркость протуберанца быстро уменьшается по мере его подъема, и редко удается проследить за ним в наземный телескоп до высоты, большей половины радиуса Солнца. До сравнительно недавних пор о дальнейшей судьбе протуберанца можно было строить лишь предположения. Например, если скорость подъема выше скорости гравитационного убегания, вероятнее всего он распрощается с Солнцем навсегда. Новые данные о дальнейшей судьбе «беглецов» стали поступать по мере развития техники наблюдений с борта космических аппаратов.

ПОРЫВЫ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Корона открывается взору наблюдателя, находящегося на поверхности Земли, лишь раз или два в году во время полного солнечного затмения.

Причем только счастливицы, оказавшиеся в нужный момент в нужном месте, где пробегает полная тень Луны, размером в поперечнике около сотни километров, имеют возможность увидеть, как внезапно померкшее дневное светило демонстрирует свой царственный венец. Тень Луны мчится по поверхности со скоростью реактивного самолета, и поэтому зрелище длится всего несколько минут. Яркость фотосферы в миллион раз выше яркости короны. Как только первый лучик фотосферы прорвется сквозь ущелье лунных гор, волшебная картина погаснет.

Француз Бернар Лио еще в 30-е годы решил, что негоже ученым мужам гоняться за капризной тенью, и создал свою, искусственную, луну. Сложный, очень тщательно изготовленный телескоп он назвал внезатменным коронографом. Однако успех был лишь частичным – только в условиях высокогорья и при благоприятной погоде удавалось отделить излучение короны от рассеянного фотосферного света. Свечение

неба оставалось главным препятствием. Космос открыл новые возможности. Небо там совершенно черное, и нужно было лишь построить портативный прибор с очень малым инструментальным рассеянием. Задача, конечно, непростая, если иметь в виду перепад яркости в шесть порядков величины, но технически выполнимая. Один из первых орбитальных коронографов работал на американской космической обсерватории «Skylab», а наиболее совершенные приборы были установлены на аппарате SOHO, о котором еще пойдет речь.

Когда стали наблюдать корону постоянно, а не короткими урывками, сразу же обнаружили, что она не только меняет свою общую форму с ходом цикла солнечной активности (11 лет), но в ней время от времени происходят быстрые драматические изменения прямо на глазах исследователя. Их первоначально называли транзидентами, как что-то мимолетное и неосязаемое. Позднее стало ясно, что большая часть этих изменений связана с выбросами вещества из нижних слоев, и утвердился термин «корональные выбросы вещества» («coronal mass ejections»). В короне, хотя она и достаточно стационарна, не выполняются точно условия гидростатического равновесия, поэтому она постоянно расширяется в межпланетное пространство. Образующиеся потоки плазмы называют солнечным ветром. Замкнутые магнитные поля, т.е. поля, силовые линии которых имеют вид петель, начинающихся и заканчивающихся на поверхности, препятствуют истечению вещества, действуют как магнитные ловушки. В таких областях плотность коронального вещества повышена и возникает наиболее заметная и протяженная структура в короне — шлемовидный стример, или корональный луч. Верхняя часть его вытянута радиально и может быть прослежена до десятков радиусов Солнца. Стримеры дают начало наиболее плотной, но медленной части солнечного ветра. В нижней части стримера под корональными арками обычно располагается спокойный протуберанец.

Там, где силовые линии поднимаются очень высоко над поверхностью, а это прежде всего области вблизи полюсов Солнца, плазма имеет возможность свободно расширяться вдоль силовых линий. Здесь формируется высокоскоростная часть ветра. Эти области свободного истечения называют корональными дырами из-за пониженной яркости в мягком рентгеновском излучении. Успешная миссия американского аппарата «Ulysses», пролетевшего по траектории над полюсами Солнца, дала очень много сведений о высокоскоростных потоках солнечного ветра.

Корональные выбросы создают самую переменчивую и трудно предсказуемую часть потока плазмы, которую можно назвать порывами ветра. Даже в минимуме солнечной активности, когда отсутствуют пятна и не бывает вспышек, корональные выбросы отнюдь не редки, а, например, в текущем году достаточно высокой активности, коронографы SOHO регистрировали иногда по несколько выбросов за сутки.

Наблюдаемая форма выбросов бывает сложна и разнообразна. Разреженность короны обуславливает малую оптическую толщину имеющих образований. Все структуры по пути луча зрения накладываются друг на друга, и совсем не просто выявить их истинную геометрию. И все же наиболее типичный выброс имеет три основные составные части: внешнюю петлю или оболочку, внутри которой располагается темная область пониженной плотности — корональная полость, а в ее центре находится самая яркая и плотная часть — ядро. Во многих событиях ясно видно, что ядро представляет собой остатки эруптивного протуберанца. Все части выброса движутся с возрастающей скоростью, причем внешняя часть — заметно быстрее центральной. Предпочтительное место «вылета» — шлемовидный стример, хотя на поздней стадии объем, охваченный возмущением, огромен даже по сравнению с Солнцем. Отголоски события, начавшегося на одной его стороне, бывают видны на противоположной.

КОРОНАЛЬНЫЕ ВЫБРОСЫ И ПРОТУБЕРАНЦЫ

Тесная связь корональных выбросов с эруптивными протуберанцами, очевидная в отдельных событиях, подтверждается статистикой по обширному массиву данных. Ни с одним другим проявлением активности выбросы не имеют столь высокого коэффициента корреляции. Магнитное поле, по-видимому, играет и здесь ключевую роль. Вряд ли что-то еще способно «возмутить» в короткое время плазму в гигантском объеме. Поля токов, которые протекают в волокнах, вполне способны справиться с подобной задачей. Не будучи слишком тесно связанными с плотной фотосферой, они обладают достаточной подвижностью и изменчивостью. Вследствие нелинейных свойств равновесия плавная постепенная эволюция может прерваться внезапной катастрофой, которая проявляется в эрупции волокна. Магнитная энергия, запасенная током, достаточна для приведения в движение выброса огромной массы, механизм ее трансформации в кинетическую энергию — недиссипативный и не встречает трудностей, связанных с высокой проводимостью солнечной плазмы.

Силовые линии магнитного поля волокна в виде спиралей обвивают пологую дугу, протянувшуюся под аркадой фонового поля. Самые высокие петли аркады сильно вытягиваются у вершины и переходят в корональный луч. Область спиральных линий внутри аркады вокруг волокна хотя и является хорошей ловушкой, но слабо связана с нижними слоями. Плазма может втекать в нее только через торцы, укорененные в фотосфере. Считается, что это одна из главных причин пониженной плотности короны вокруг волокна⁵. При эрупции весь жгут спиральных линий начинает подниматься, увлекая за собой вещество протуберанца. Что же произойдет в окружающей короне?

Есть основания сомневаться в том, что протуберанец — «двигатель» коронального выброса, поскольку фронтальная часть последнего движется быстрее протуберанца⁶. Дескать, как телега может катиться быстрее лошади? Кроме того, не всегда яркий плотный протуберанец виден внутри корональных выбросов вещества. Вероятно, эти сомнения могут быть разрешены, если помнить, что главный хозяин положения в короне — магнитное поле. Оно вынуждает плазму перемещаться вместе с силовыми линиями. Это свойство называют вмороженностью магнитного поля в плазму.

При движении прямолинейного тока все силовые линии его магнитного поля движутся с одинаковой скоростью: ни одна не обгоняет источник поля, и ни одна не отстает. Но в нашей модели фигурирует еще зеркальный ток. Его поле приводит к отставанию силовых линий под волокном и опережению над волокном. Скорость перемещения силовых линий над волокном растет по мере удаления от него. Более высокие линии опережают более низкие, так что расстояние между двумя силовыми линиями увеличивается со временем. Поскольку плазма «приклеена» к силовым линиям, ее плотность будет постоянно уменьшаться: если бы над волокном и не было полости, она все равно образовалась бы в процессе эрупции. Размеры полости все так же определяются протяженностью области, где доминирует поле тока волокна. Граница этой области и есть фронтальная часть выброса, его оболочка. Вблизи нее собирается плазма, «вметенная» из полости⁷.

В балансе сил, действующих на протуберанец, его вес — фактор второстепенный. Главное действующее лицо здесь — ток или связанный с ним жгут магнитных силовых линий. Он может быть нагружен веществом в большей

⁵ Low B.C. // Solar Phys. 1996. V.167. P.217–265.

⁶ Hundhausen A.J. // Scientific Highlights of the Solar Maximum Mission / Eds K.T. Strong, J.L.R. Saba and B.M. Haisch. Berlin, 1994.

⁷ Filippov B.P. // Astron. Astrophys. 1996. V.313. P.277–284.

или меньшей степени: протуберанец может оказаться как плотным, так и весьма разреженным, но это почти никак не влияет на эволюцию жгута. Можно себе представить эрупцию практически пустой трубки, и в этом случае в структуре коронального выброса, конечно, будет отсутствовать яркое ядро.

Магнитная структура жгута, отчетливо проявляющаяся в протуберанцах и волокнах, сохраняется не только в короне, но и на огромном удалении от Солнца. Космические зонды регистрируют в межпланетном пространстве облака плазмы с магнитным полем, обладающим спиральностью, причем именно того вида, что наблюдалась в соответствующем эруптивном протуберанце.

ШТОРМОВЫЕ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ

Время распространения возмущения от Солнца до Земли — трое-четверо суток. Если замечено появление коронального выброса, в запасе есть время подготовиться к началу геомагнитной бури и принять необходимые меры предосторожности. К сожалению, внезатменные коронографы видят только лимбовые явления, т.е. распространяющиеся не в сторону Земли, а в боковых направлениях. Центральная часть закрыта затмевающим диском, «искусственной луной». Лишь иногда выброс, движущийся на наблюдателя, регистрируется как диффузное усиление яркости по всему лимбу, называемое гало. Для отслеживания геоэффективных выбросов необходимо расположить несколько коронографов не вблизи Земли или на линии Солнце—Земля, а сбоку. Сейчас разрабатываются проекты «Стерео» и «Система», которые предусматривают размещение на орбите Земли нескольких космических обсерваторий, далеко

разнесенных друг от друга. Это позволит осуществлять мониторинг всей поверхности Солнца и, в частности, наблюдать с боковых позиций выбросы, следующие в направлении Земли.

Можно также выслать «разведчика» в направлении к Солнцу, с тем чтобы он регистрировал появление межпланетного облака и сообщал о грядущей буре. Есть орбита искусственного спутника Земли с периодом обращения, равным году, находясь на которой аппарат все время не покидает линию Солнце—Земля. Именно в этом месте, называемом точкой Лагранжа, которая удалена от Земли на расстояние около полутора миллионов километров, располагается космическая обсерватория SOHO. Частицы, регистрируемые ею, достигают Земли примерно через 3 ч, и этого времени вполне достаточно для краткосрочного оповещения землян о предстоящей космической погоде.

Наконец, можно прогнозировать появления выбросов, исходя из физического механизма их возникновения. Магнитные жгуты, если они заполнены веществом, в линии H_{α} видны как волокна. По степени закрученности жгутов, их высоте над фотосферой уверенно оценивается запас их устойчивости и предрасположенность к эрупции. Подъем волокна или эруптивный протуберанец наверняка повлечет за собой и корональный выброс. Корональные структуры, наблюдаемые в ультрафиолетовом и мягком рентгеновском излучении, также отображают корональные токи и их динамику.

Человечество осознало, что космическая погода оказывает заметное влияние на нашу жизнь, и скоро ее прогноз станет таким же необходимым и привычным, как обещание дождя или солнечного дня в вечернем выпуске новостей.