WHAT SOLAR WIND IS

V. B. BARANOV

The gas dynamic problem of the supersonic solar corona expansion (solar wind) is considered. Four main issues are presented:* 1) *the reasons of the plasma outflow from the solar corona;* 2) *whether this outflow is homogeneous;* 3) *variation of the solar wind parameters with the heliocentric distance and* 4) *the solar wind outflow in the interstellar medium.

В статье рассматривается проблема сверхзвукового расширения солнечной короны (солнечный ветер). Анализируются четыре главные проблемы:* 1) *причины истечения плазмы из солнечной короны;* 2) *однородно ли такое истечение;* 3) *изменение параметров солнечного ветра с удалением от Солнца и* 4) *как солнечный ветер истекает в межзвездную среду.

ЧТО ТАКОЕ СОЛНЕЧНЫЙ ВЕТЕР

В. Б. БАРАНОВ

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ВВЕДЕНИЕ

Прошло почти 40 лет с тех пор, как американский физик Е. Паркер [1] теоретически предсказал явление, которое получило название “солнечный ветер” и которое через пару лет было подтверждено экспериментально группой советского ученого К. Грингауза при помощи приборов, установленных на космических аппаратах “Луна-2” и “Луна-3”. Солнечный ветер представляет собой поток полностью ионизованной водородной плазмы, то есть газа, состоящего из электронов и протонов примерно одинаковой плотности (условие квазинейтральности), который с большой сверхзвуковой скоростью движется от Солнца. На орбите Земли (на одной астрономической единице (а.е.) от Солнца) скорость V_E этого потока равна примерно 400–500 км/с, концентрация протонов (или электронов) $n_e = 10–20$ частиц в кубическом сантиметре, а их температура T_e равна примерно 100 000 К (температура электронов несколько выше).

Кроме электронов и протонов в межпланетном пространстве были обнаружены альфа-частицы (порядка нескольких процентов), небольшое количество более тяжелых частиц, а также магнитное поле, средняя величина индукции которого оказалась на орбите Земли порядка нескольких гамм ($1\ \gamma = 10^{-5}$ Гс).

НЕМНОГО ИСТОРИИ, СВЯЗАННОЙ С ТЕОРЕТИЧЕСКИМ ПРЕДСКАЗАНИЕМ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

В течение не столь уж длительной истории теоретической астрофизики считалось, что все атмосферы звезд находятся в гидростатическом равновесии, то есть в состоянии, когда сила гравитационного притяжения звезды уравновешивается силой, связанной с градиентом давления в ее атмосфере (с изменением давления на единицу расстояния r от центра звезды). Математически это равновесие выражается в виде обыкновенного дифференциального уравнения

$$\frac{dp}{dr} = -\rho\frac{GM_*}{r^2}, \qquad (1)$$

где G – гравитационная постоянная, M_* – масса звезды, p – давление атмосферного газа, ρ – его массовая плотность. Если распределение температуры T

© Баранов В.Б., 1996

в атмосфере задано, то из уравнения равновесия (1) и уравнения состояния для идеального газа

$$p = \rho RT, \qquad (2)$$

где R – газовая постоянная, легко получается так называемая барометрическая формула, которая в частном случае постоянной температуры T будет иметь вид

$$p = p_0 \exp\left[\frac{GM_*}{RT}\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_0}\right)\right]. \qquad (3)$$

В формуле (3) величина p_0 представляет собой давление у основания атмосферы звезды (при $r = r_0$). Из этой формулы видно, что при $r \longrightarrow \infty$, то есть на очень больших расстояниях от звезды давление p стремится к конечному пределу, который зависит от значения давления p_0.

Поскольку считалось, что солнечная атмосфера, так же как и атмосферы других звезд, находится в состоянии гидростатического равновесия, то ее состояние определялось формулами, аналогичными формулам (1)–(3). Учитывая необычное и до конца еще непонятое явление резкого возрастания температуры примерно от 10 000 градусов на поверхности Солнца до 1 000 000 градусов в солнечной короне, Чепмен (см., например, [2]) развил теорию статической солнечной короны, которая должна была плавно переходить в межзвездную среду, окружающую Солнечную систему.

Однако в своей пионерской работе [1] Паркер обратил внимание на то, что давление на бесконечности, получаемое из формулы типа (3) для статической солнечной короны, оказывается почти на порядок величины больше значения давления, которое оценивалось для межзвездного газа на основе наблюдений. Чтобы устранить это расхождение, Паркер предположил, что солнечная корона не находится в состоянии статического равновесия, а непрерывно расширяется в окружающую Солнце межпланетную среду. При этом вместо уравнения равновесия (1) он предложил использовать гидродинамическое уравнение движения вида

$$\rho V\frac{dV}{dr} + \frac{dp}{dr} = -\rho\frac{GM_\odot}{r^2}, \qquad (4)$$

где в системе координат, связанной с Солнцем, величина V представляет собой радиальную скорость движения плазмы. Под $M_\odot$ подразумевается масса Солнца.

При заданном распределении температуры T система уравнений (2) и (4) имеет решения типа представленных на рис. 1. На этом рисунке через a обозначена скорость звука, а r_* – расстояние от начала координат, на котором скорость газа равна скорости звука ($V = a$). Очевидно, что только кривые *1* и *2* на рис. 1 имеют физический смысл для проблемы

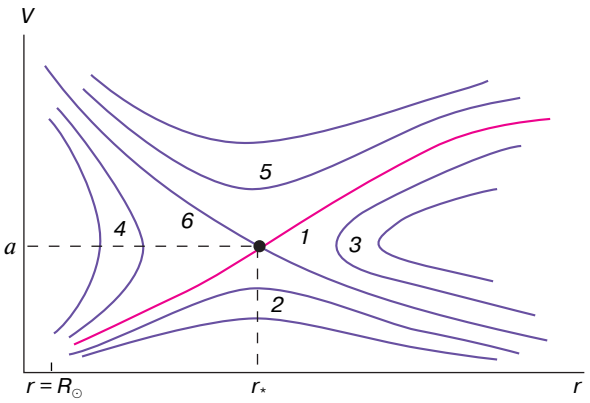


Рис. 1. Возможные решения одномерных уравнений газовой динамики для скорости V течения газа от поверхности Солнца в присутствии силы гравитации. Кривая *1* соответствует решению для солнечного ветра. Здесь a – скорость звука, r – расстояние от Солнца, r_* – расстояние, на котором скорость газа равна скорости звука, $R_\odot$ – радиус Солнца.

истечения газа из Солнца, поскольку кривые *3* и *4* имеют неединственные значения скорости в каждой точке, а кривые *5* и *6* соответствуют очень большим скоростям в солнечной атмосфере, что не наблюдается в телескопы. Паркер проанализировал условия, при которых в природе осуществляется решение, соответствующее кривой *1*. Он показал, что для согласования давления, получаемого из такого решения, с давлением в межзвездной среде наиболее реален случай перехода газа от дозвукового течения (при $r < r_*$) к сверхзвуковому (при $r > r_*$), и назвал такое течение солнечным ветром. Однако это утверждение оспаривалось в работе [3] Чемберленом, который полагал наиболее реальным решение, соответствующее кривой *2*, описывающей всюду дозвуковой "солнечный бриз". При этом первые эксперименты на космических аппаратах (см., например, [4]), обнаружившие сверхзвуковые потоки газа от Солнца, не казались, судя по литературе, Чемберлену достаточно достоверными.

История экспериментов в космическом пространстве блестяще доказала правильность представлений Паркера о солнечном ветре. Подробный материал о теории солнечного ветра можно найти, например, в монографии [5].

ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБ ОДНОРОДНОМ ИСТЕЧЕНИИ ПЛАЗМЫ ИЗ СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЫ

Из одномерных уравнений газовой динамики можно получить известный результат: при отсутствии массовых сил сферически-симметричное течение газа от точечного источника может быть всюду либо дозвуковым, либо сверхзвуковым. Присутствие в уравнении (4) гравитационной силы (правая

часть) приводит к тому, что появляются решения типа кривой *1* на рис. 1, то есть с переходом через скорость звука. Проведем аналогию с классическим течением в сопле Лаваля, которое представляет собой основу всех сверхзвуковых реактивных двигателей. Схематически это течение показано на рис. 2. В бак *1*, называемый ресивером, с очень маленькой скоростью подается газ, нагретый до очень высокой температуры (внутренняя энергия газа много больше его кинетической энергии направленного движения). Путем геометрического поджатия канала газ ускоряется в области *2* (дозвуковое течение) до тех пор, пока его скорость не достигнет скорости звука. Для дальнейшего его ускорения необходимо канал расширять (область *3* сверхзвукового течения). Во всей области течения ускорение газа происходит за счет его адиабатического (без подвода тепла) охлаждения (внутренняя энергия хаотического движения переходит в энергию направленного движения).

В рассматриваемой проблеме образования солнечного ветра роль ресивера играет солнечная корона, а роль стенок сопла Лаваля – гравитационная сила солнечного притяжения. Согласно теории Паркера, переход через скорость звука должен происходить где-то на расстоянии в несколько солнечных радиусов. Однако анализ получаемых в теории решений показал, что температуры солнечной короны недостаточно, чтобы ее газ мог ускориться до сверхзвуковых скоростей, как это имеет место в теории сопла Лаваля. Должен существовать какой-то дополнительный источник энергии. Таким источником в настоящее время считается диссипация всегда присутствующих в солнечном ветре волновых движений (иногда их называют плазменной турбулентностью), накладывающихся на среднее течение, а само течение уже не является адиабатическим. Количественный анализ таких процессов еще требует своего исследования.

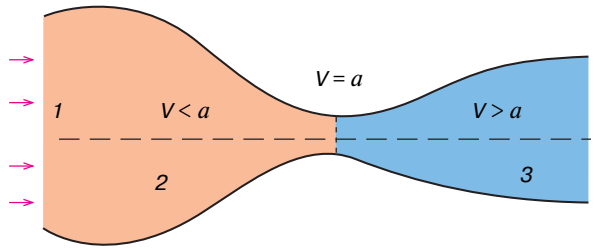


Рис. 2. Схема течения в сопле Лаваля: *1* – бак, называемый ресивером, в который с малой скоростью подается очень горячий воздух, *2* – область геометрического поджатия канала с целью ускорения дозвукового потока газа, *3* – область геометрического расширения канала с целью ускорения сверхзвукового потока.

Интересно, что наземные телескопы обнаруживают на поверхности Солнца магнитные поля. Средняя величина их магнитной индукции B оценивается в 1 Гс, хотя в отдельных фотосферных образованиях, например в пятнах, магнитное поле может быть на порядки величины больше. Поскольку плазма является хорошим проводником электричества, то естественно, что солнечные магнитные поля взаимодействуют с ее потоками от Солнца. В этом случае чисто газодинамическая теория дает неполное описание рассматриваемого явления. Влияние магнитного поля на течение солнечного ветра можно рассмотреть только в рамках науки, которая называется магнитной гидродинамикой. К каким результатам приводят такие рассмотрения? Согласно пионерской в этом направлении работе [6] (см. также [5]), магнитное поле приводит к появлению электрических токов j в плазме солнечного ветра, что, в свою очередь, приводит к появлению пондеромоторной силы $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$, которая направлена в перпендикулярном к радиальному направлении. В результате у солнечного ветра появляется тангенциальная компонента скорости. Эта компонента почти на два порядка меньше радиальной, однако она играет существенную роль в выносе из Солнца момента количества движения. Предполагают, что последнее обстоятельство может играть существенную роль в эволюции не только Солнца, но и других звезд, у которых обнаружен “звездный ветер”. В частности, для объяснения резкого уменьшения угловой скорости звезд позднего спектрального класса часто привлекается гипотеза о передаче вращательного момента образующимся вокруг них планетам. Рассмотренный механизм потери углового момента Солнца путем истечения из него плазмы открывает возможность пересмотра этой гипотезы.

Хотелось бы отметить, что измерения среднего магнитного поля в районе орбиты Земли показали, что его величина и направление хорошо описываются формулами

$$B_r = B_{r0}\left(\frac{r_0}{r}\right)^2, \qquad B_\varphi = \frac{B_{r0}\Omega}{V}\left(\frac{r_0}{r}\right)^2 (r - r_0), \qquad (5)$$

полученными из более простых рассмотрений Паркером (см. [6]). В формулах (5), описывающих паркеровскую спираль Архимеда для межпланетного магнитного поля в плоскости солнечного экватора, почти совпадающей с плоскостью эклиптики, величины B_r, B_φ – радиальная и азимутальная компоненты вектора магнитной индукции соответственно, Ω – угловая скорость вращения Солнца, V – радиальная скорость солнечного ветра, индекс 0 относится к точке солнечной короны, в которой величина магнитного поля известна.

ОДНОРОДНО И СТАЦИОНАРНО ЛИ ВЫТЕКАЕТ СОЛНЕЧНЫЙ ВЕТЕР С ПОВЕРХНОСТИ СОЛНЦА?

Рассмотренное в предыдущем разделе представление об истечении плазмы из солнечной короны исходит из предположения о том, что солнечная корона является однородной и стационарной, то есть ее температура и плотность не зависят от солнечной широты и долготы и от времени. В этом случае солнечный ветер можно рассматривать как сферически-симметричное (зависящее только от гелиоцентрического расстояния) стационарное течение. До 1990 года все космические аппараты летали вблизи плоскости солнечной эклиптики, что не позволяло прямыми методами измерений проверить степень зависимости параметров солнечного ветра от солнечной широты. Косвенные же наблюдения отклонения хвостов комет, пролетавших вне плоскости эклиптики, указывали на то, что в первом приближении такой зависимости нет. Однако измерения в плоскости эклиптики показали, что в межпланетном пространстве могут существовать так называемые секторные структуры с различными параметрами солнечного ветра и различным направлением магнитного поля. Такие структуры вращаются вместе с Солнцем и явно указывают на то, что они являются следствием аналогичной структуры в солнечной атмосфере, параметры которой зависят от долготы. Качественно четырехсекторная структура показана на рис. 3. Вывод же о независимости солнечного ветра по широте на основании кометных наблюдений не был достаточно надежным из-за сложностей их интерпретации, а наблюдения солнечной короны показывали, что она неоднородна и по широте и по долготе, а также подвержена сильным временным изменениям, связанным как с 11-летним циклом солнечной активности, так и с различными нестационарными процессами с более коротким временным интервалом (например, со вспышками на Солнце).

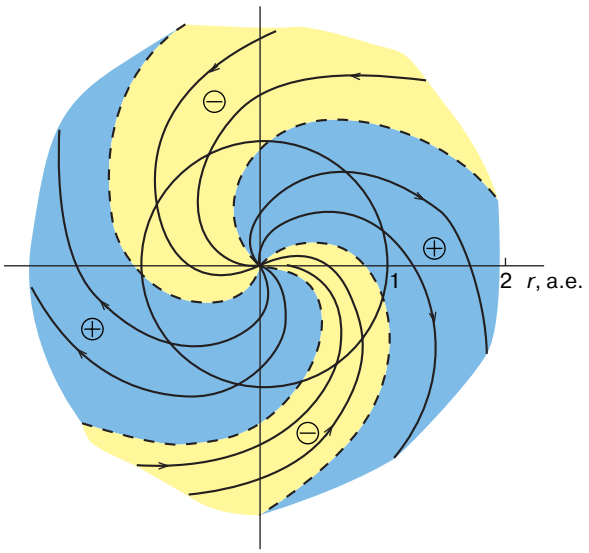


Рис. 3. Схематическая картина магнитных силовых линий в солнечном ветре, отображающая возможную четырехсекторную структуру.

Ситуация резко изменилась с запуском Европейским космическим агентством в октябре 1990 года космического аппарата “Улисс”, основной целью которого является исследование межпланетной плазмы вне плоскости солнечной эклиптики. Эти исследования начались в феврале 1992 года, когда, используя гравитационное поле Юпитера, аппарат вышел из эклиптической плоскости и направился сначала к областям межпланетной плазмы со стороны южного полюса Солнца (измерения в этих областях продолжались с мая по сентябрь 1994 года), а затем к областям со стороны северного полюса (здесь измерения проводились с мая по сентябрь 1995 года). Большинство полученных результатов сейчас тщательно анализируются, но уже можно сделать некоторые выводы о зависимости параметров солнечного ветра от солнечной широты (большое число научных сообщений по этим проблемам помещено в американском журнале “Science”, 1995, volume 268, May 19).

В частности, оказалось, что скорость солнечного ветра возрастает, а плотность уменьшается с гелиографической широтой. Измеренная, например, на аппарате “Улисс” скорость солнечного ветра изменилась от 450 км/с в плоскости эклиптики примерно до 700 км/с на –75° солнечной широты. Надо, однако, отметить, что степень различия параметров солнечного ветра в плоскости эклиптики и вне ее зависит от цикла солнечной активности.

Вспышки на Солнце и разные скорости истечения плазмы из разных областей его поверхности приводят к тому, что в межпланетном пространстве образуются межпланетные ударные волны, которые характеризуются резким скачком скорости, плотности и температуры. Качественно механизм их образования показан на рис. 4. Когда быстрый поток плазмы догоняет более медленный, то в месте их соприкосновения возникает произвольный разрыв параметров, на котором не выполняются законы сохранения массы, импульса и энергии. Такой разрыв не может существовать в природе и распадается, в частности, на две ударные волны и тангенциальный разрыв (на последнем давление и нормальная компонента скорости непрерывны), как это показано на рис. 4, *а* для вспышечного процесса на Солнце и на рис. 4, *б* в том случае, когда быстрый поток от одной области солнечной короны догоняет более медленный, вытекающий из другой. Ударные волны и тангенциальные разрывы, изображенные на рис. 4, сносятся солнечным ветром на большие гелиоцентрические расстояния и регулярно регистрируются космическими аппаратами.

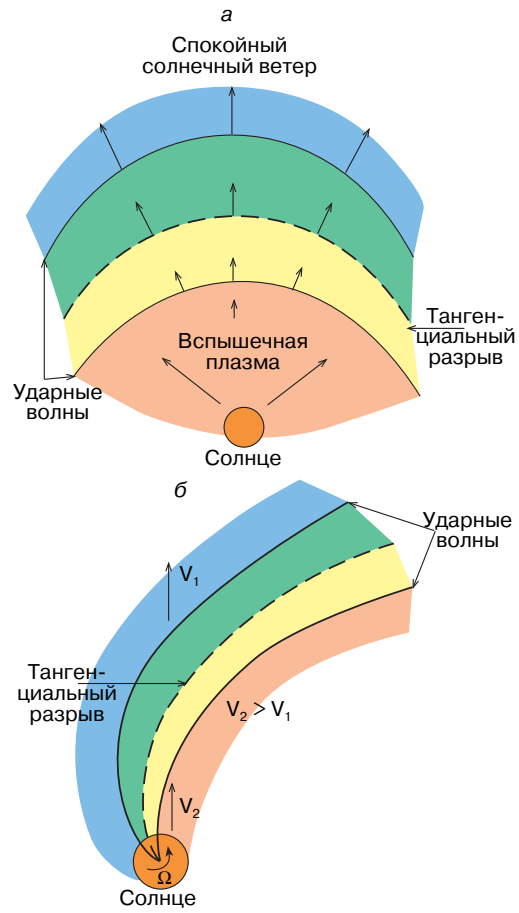


Рис. 4. *а* – качественная картина структуры течения, возникающего от воздействия на спокойный солнечный ветер высокоскоростного потока плазмы от Солнца, образовавшегося во время вспышки. Тангенциальный разрыв отделяет солнечный ветер, возмущенный внешней ударной волной, от вспышечной плазмы, возмущенной внутренней ударной волной.
б – качественная картина структуры течения, возникающего в солнечном ветре в том случае, когда более быстрый поток из одной области солнечной поверхности догоняет более медленный поток, истекающий из другой. Ω – угловая скорость вращения Солнца.

КАК ИЗМЕНЯЮТСЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА С УДАЛЕНИЕМ ОТ СОЛНЦА?

Как видно из уравнения (4), изменение скорости солнечного ветра определяется двумя силами: силой солнечной гравитации и силой, связанной с изменением давления. Расчеты показывают, что на достаточно больших расстояниях от Солнца (практически уже с 1 а.е.) давление почти не изменяется по величине, то есть его изменение очень мало, и сила, связанная с давлением, практически отсутствует. Сила гравитации убывает как квадрат расстояния от Солнца и тоже мала на достаточно больших гелиоцентрических расстояниях. Поскольку обе силы становятся очень малы, то, согласно теории, скорость солнечного ветра становится почти постоянной и при этом значительно превосходит звуковую (как говорят, течение гиперзвуковое). Американские космические аппараты “Вояджер-1 и -2” и “Пионер-10 и -11”, запущенные еще в 70-х годах и находящиеся сейчас на расстояниях от Солнца в несколько десятков астрономических единиц, экспериментально подтвердили теоретические представления о солнечном ветре. В частности, его скорость оказалась в среднем почти постоянной, а плотность ρ убывает как $1/r^2$ в соответствии с уравнением сохранения массы для сферически-симметричного случая:

$$\rho V r^2 = \text{const}.$$

Температура же не следует адиабатическому закону, что означает существование каких-то источников тепла. Такими источниками могут быть упоминавшаяся нами диссипация волн или нейтральные атомы водорода, проникающие из межзвездной среды в Солнечную систему (этот процесс подробно рассматривался в [8]).

Очевидно, что скорость солнечного ветра не может быть до бесконечности постоянной, как это следует из решения уравнений газовой динамики (см., например, рис. 1), поскольку Солнечная система окружена межзвездным газом с конечным давлением. Поэтому солнечный ветер на больших расстояниях от Солнца должен тормозиться газом межзвездной среды. Эта проблема подробно рассмотрена в [8]. Здесь только отметим, что плавное торможение газодинамического потока от сверхзвуковых скоростей до дозвуковых, например в сопле Лаваля (см. рис. 2), путем сужения канала невозможно: обязательно должен образоваться скачок параметров газа в виде ударной волны. Аналогичная ситуация может возникнуть и в солнечном ветре. Торможение солнечного ветра из-за противодавления межзвездной среды должно происходить через ударную волну торможения (в английской терминологии *termination shock* или сокращенно TS). Ее положение сильно зависит от параметров межзвездной среды. Согласно теоретическим расчетам, ударная волна TS находится на расстоянии примерно от 80 до 100 а.е. от Солнца (см. [8]), что позволяет в течение ближайших нескольких лет детектировать ее измерительными приборами, установленными на космических аппаратах “Вояджер”.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из рассмотренного выше можно сделать заключение, что солнечный ветер – это физическое явление, которое представляет не только чисто академический интерес, связанный с изучением процессов

в плазме, находящейся в естественных условиях космического пространства, но и фактор, который необходимо учитывать при изучении процессов, происходящих в окрестности нашей планеты Земли, что в конце концов влияет на нашу жизнь. Это обусловлено тем, что высокоскоростные потоки солнечного ветра, обтекая Землю, влияют на ее магнитосферу, которая непосредственно связана с более низкими слоями атмосферы. Такое влияние в сильной степени зависит от процессов, происходящих на Солнце, поскольку они связаны с зарождением самого солнечного ветра. Таким образом, солнечный ветер является хорошим индикатором для изучения важных для практической деятельности человека солнечно-земных связей. Однако это уже другая область научных исследований, которой мы не будем касаться в этой статье.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Parker E.* // Astrophys. J. 1958. V. 128. № 3.

2. *Chapman S.* // J. Atmos. Terr. Phys. 1959. V. 15. № 1/2.

3. *Chamberlain J.* // Astrophys. J. 1961. V. 133. № 2.

4. *Грингауз К.И.*, *Безруких В.В.*, *Озеров В.Д.*, *Рыбчинский Р.Е.* // Докл. АН СССР. 1960. Т. 131. № 6.

5. *Баранов В.Б.*, *Краснобаев К.В.* Гидродинамическая теория космической плазмы. М.: Наука, 1977.

6. *Weber E.*, *Davis L.* // Astrophys. J. 1967. V. 148. № 1. Pt. 1.

7. *Паркер Е.* Динамические процессы в межпланетной среде. М.: Мир, 1965.

8. *Баранов В.Б.* Влияние межзвездной среды на строение гелиосферы // Соросовский Образовательный Журнал. 1996. № 11. С. 73–79.

* * *

Владимир Борисович Баранов, доктор физико-математических наук, профессор кафедры аэромеханики и газовой динамики механико-математического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, зав. лабораторией физической газовой динамики Института проблем механики РАН. Член редколлегии журнала "Известия РАН. Механика жидкости и газа". Область научных интересов: аэромеханика и газовая динамика, магнитная гидродинамика и динамика плазмы. Автор более 80 статей и двух монографий.