

Влияние солнечного ветра на атмосферы Марса и Венеры

О.Л. ВАЙСБЕРГ,
доктор физико-математических наук
ИКИ РАН

Солнечный ветер, образующийся при истечении плазмы из короны светила, при встрече с планетами, обладающими собственным магнитным полем, формирует вокруг них магнитные полости – магнитосферы. Оказалось, что магнитосферы у планет без магнитных полей состоят из магнитных трубок солнечного ветра, заполняемых планетарными ионами. Эти



“аккреционные магнитосферы” не полностью защищают атмосферу от солнечного ветра, наоборот, через магнитные хвосты ускользает значительная часть их атмосфер. Для Марса эти процессы оказались катастрофическими, за несколько миллиардов лет он потерял большую часть своей атмосферы, а с нею и воду.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА С НЕБЕСНЫМИ ТЕЛАМИ

Солнечный ветер (СВ), рождающийся в короне Солнца, заполняет собой пространство приблизительно в 100 раз больше расстояния от нашей звезды до Земли и оказывает влияние на все

тела Солнечной системы. Планеты, имеющие собственное магнитное поле (Меркурий, Земля, Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун), препятствуют движению потока замагниченной плазмы СВ, в нем возникают магнитные полости. Твердые тела, такие как Луна и

астероиды, нейтрализуют плазму солнечного ветра, образуя плазменную тень в виде экрана. Сложные явления происходят, когда СВ взаимодействует с Марсом, Венерой и кометами, не имеющими магнитного поля, но с достаточно плотной атмосферой.

гнуть препятствие, например магнитное поле Земли. Оно в подсолнечной точке на расстоянии примерно 70 тыс. км обеспечивает такое же давление, как у солнечного ветра. В потоке СВ образуется полость (магнитосфера), контролируемая магнитным полем Земли и простирающаяся свой магнитный хвост на миллионы километров в направлении, противоположном солнечному. Конфигурация магнитосферы формируется из трех токовых систем: в жидком металлическом ядре Земли, на границе между обтекающим потоком СВ и магнитным полем Земли (магнитопауза) и между долями хвоста магнитосферы.

Исследование магнитосферы Земли – одно из важнейших направлений современных космических исследований, мотивированных как стремлением к познанию физики и динамики магнитосферы, так и влиянием магнитосферных процессов на нашу повседневную жизнь.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА С МАРСОМ

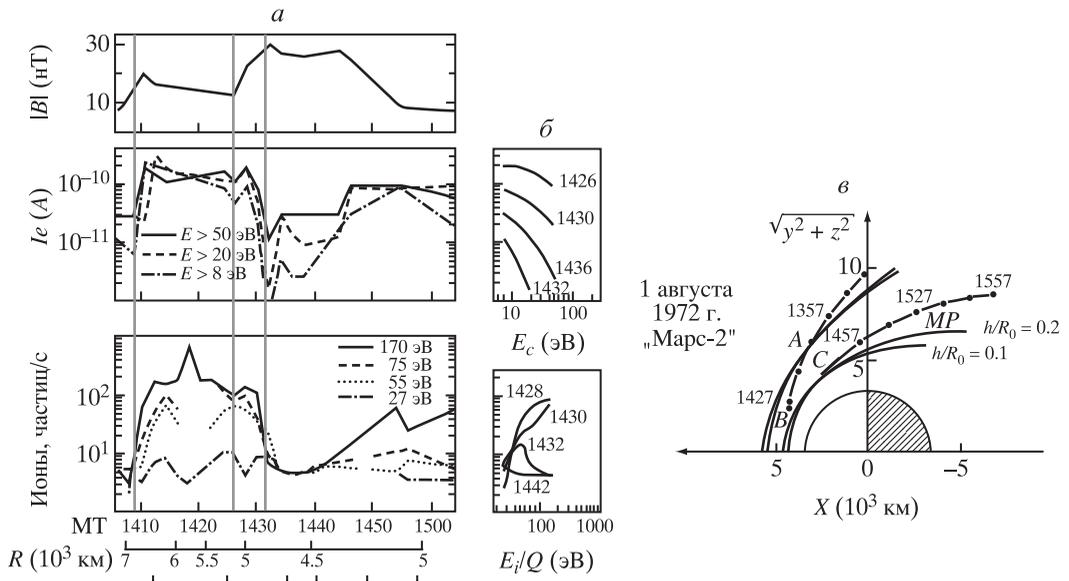
В 1960-х гг. начались исследования Марса и Венеры с помощью советских и американских АМС, но они были кратковременными и проводились с помощью про-

летных и спускаемых аппаратов. Внимание уделялось главным образом исследованию атмосфер и поверхностей планет. Ни у Марса, ни у Венеры не предполагалось сильных планетарных магнитных полей. 15 июля 1965 г. АМС “Маринер-4” пролетела на расстоянии 9846 км от поверхности Марса и зарегистрировала возмущение магнитного поля, интерпретированное как возможное пересечение головной ударной волны (Земля и Вселенная, 1966, № 2, с. 87, 91). Первоначально некоторые исследователи рассматривали это как доказательство существования магнитного поля, которое служит препятствием для сверхзвукового потока СВ.

Основной толчок к исследованию внешней оболочки Марса и ее взаимодействия с СВ дали первые советские искусственные спутники Марса – “Марс-2, -3” (1971) и “Марс-5” (1973). Хотя они находились на орбитах, не слишком удобных для исследования области взаимодействия СВ с планетой вследствие большой высоты перигея над поверхностью Марса (1100 км) и недостаточного зондирования ночной стороны планеты, удалось получить интересные результаты (Земля и Вселенная, 1974, № 2). Три группы ученых выполнили эксперименты: плазменный с помо-

щью прибора Д-127 под руководством К.И. Грингауза, магнитный с помощью магнитометра под руководством Ш.Ш. Долгинова и плазменный с помощью прибора РИЭП-2801 под руководством автора статьи. Достоверно установлено присутствие головной ударной волны и области на дневной стороне Марса, в которой магнитное поле было усилено. Ионы и электроны меньших энергий регистрировались в области обтекания Марса СВ. Ударная волна определялась по резкому возрастанию величины магнитного поля и потока ионов и электронов малых энергий. Область препятствия потоку СВ установлена по одновременному возрастанию магнитного поля и уменьшению энергий ионов и электронов.

На “Марсе-2 и -3” было обнаружено, что магнитопазменная оболочка практически непроницаема. Это препятствие, природу которого необходимо было установить, служит причиной образования отошедшей ударной волны. Большая высота препятствия над планетой и ее ионосферой показала, что оно образуется не за счет взаимодействия с ионосферой планеты, а должен быть какой-то дополнительный фактор, определяющий высоту препятствия потоку СВ. Авторы экспериментов



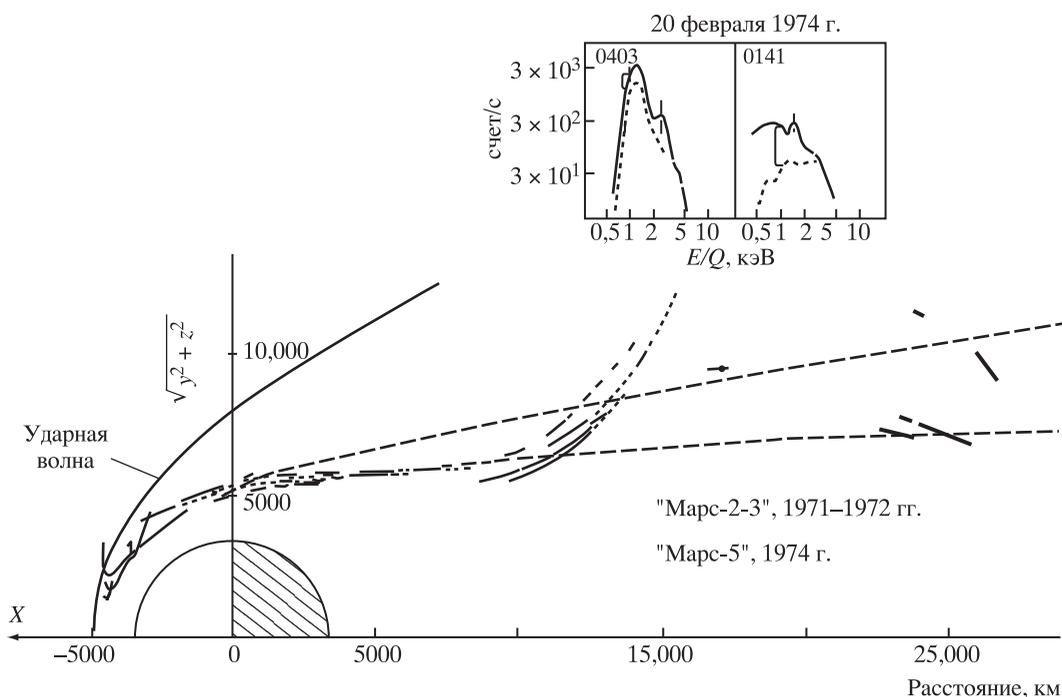
Графики пересечения ударной волны (жирная линия) и области низкоэнергичных ионов (ограничена двумя тонкими линиями), измеренных прибором РИЭП-2801 на дневной стороне Марса (а); спектры ионов и электронов с указанием времени измерения (б); орбита ИСМ "Марс-2" (в). Эксперимент Ш.Ш. Долгинова, приборы Д-127 и РИЭП-2801.

на "Марсе-2 и -3" разошлись в интерпретации природы этого препятствия. Ш.Ш. Долгинов и К.И. Грингауз считали, что причиной относительно большой высоты границы препятствия может быть собственное планетарное магнитное поле с магнитным моментом $2,4 \times 10^{22}$ Гс · см³. Предпочтительным объяснением наблюдавшегося размера препятствия у

Марса автор статьи и его коллеги считали взаимодействие СВ с атмосферой планеты кометного типа.

Наблюдения автором аналогичных экспериментов, выполненных ИСМ "Марс-5", дополнили результаты "Марса-2 и -3", в особенности благодаря тому, что его орбита проходила и по ночной стороне планеты. Эксперименты, проведенные на "Марсе-5" прибором РИЭП-2801, позволили убедительно установить существование плазменного хвоста – продолжения области низкоэнергичных ионов на дневной стороне Марса. Наблюдаемые ионы на дневной стороне препятствия постепенно ускоряются и образуют убегающий от планеты поток во внешней области магнитоплазменного хвоста.

В анализаторах ионов прибора РИЭП-2801 в качестве детекторов (счетчиков частиц) использовались каналные электронные умножители (КЭУ). Было обнаружено, что в определенных режимах можно использовать КЭУ в качестве масс-анализаторов, в частности уровня чувствительности при регистрации легких ионов, составляющих поток солнечного ветра, отличается от такового при регистрации тяжелых ионов (например, кислорода). Использование этого свойства КЭУ при измерениях ионов вблизи Марса позволило обнаружить тяжелые ионы (наиболее вероятно, ионы кислорода) в потоке плазмы вблизи Марса. Ионы кислорода составляют добавку в потоке солнечной плаз-



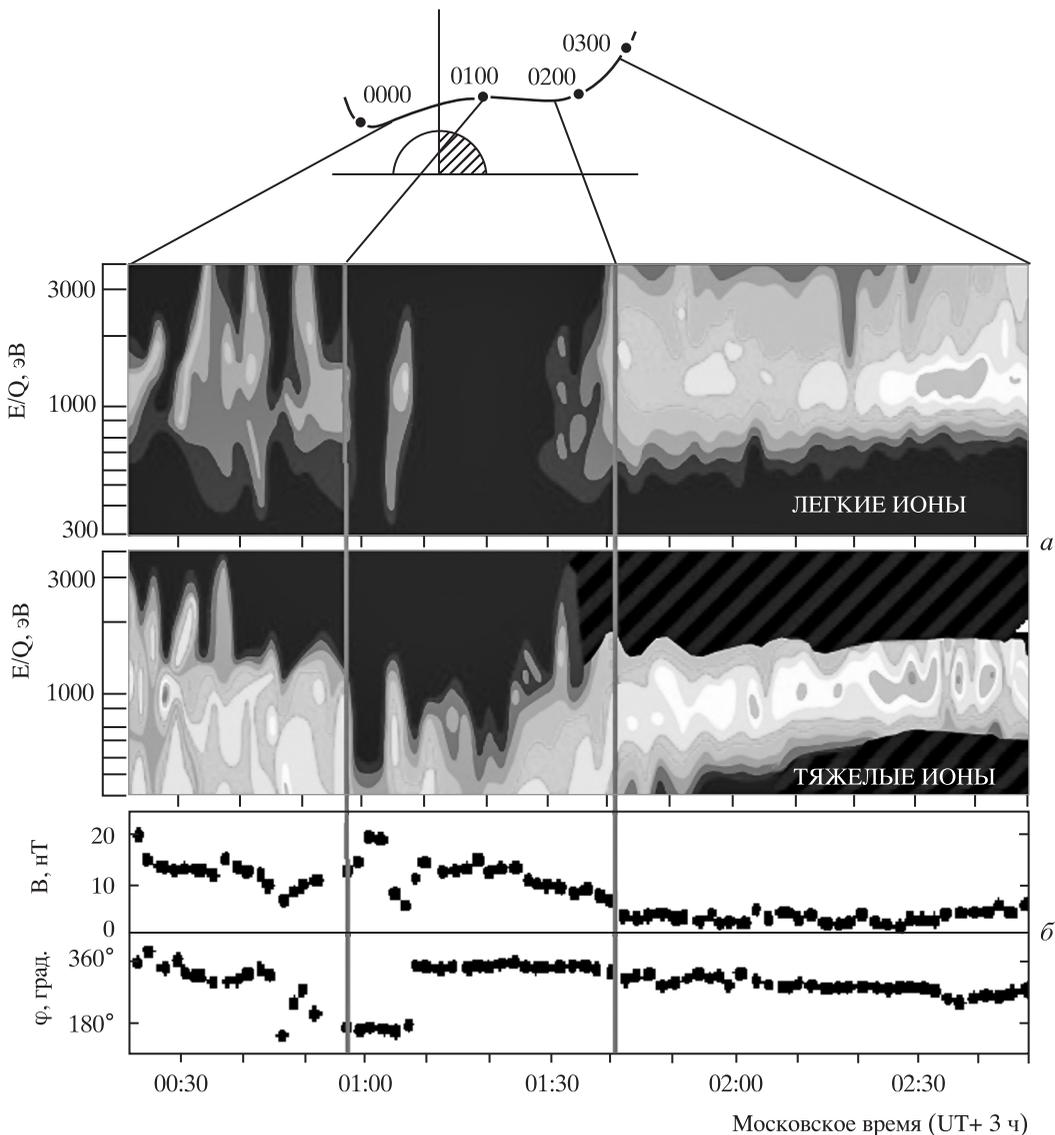
мы, обтекающей Марс. С приближением к планете РИЭП-2801 фиксировал все большее количество тяжелых ионов в потоке плазмы. Было зарегистрировано резкое изменение состава ионов при переходе от обтекающего потока солнечной плазмы с добавкой планетарных ионов к магнитному хвосту планеты, в котором преобладают планетные ионы. Протоны обтекающего потока практически не попадают в хвост Марса. Это было первое наблюдение захвата солнечным ветром ионов, называемого массовой нагрузкой.

Важный результат эксперимента на "Марсе-5" – оценка потери планетной атмосферных ионов

при обтекании планеты СВ. Измерения потока тяжелых ионов в хвосте проводилось с помощью прибора РИЭП-2801 при разных величинах потока ионов в СВ. Усреднив измерения, произведенные в разное время, и предположив, что ускоренные планетные ионы движутся в сторону от планеты в слое толщиной около 1000 км у границы хвоста, можно сделать вывод, что Марс теряет в секунду приблизительно 2×10^{25} ионов кислорода, то есть 300 г/с. Атмосфера Марса весьма разрежена: давление у поверхности составляет одну тысячную атмосферного давления на Земле, а полная масса атмосферы – $2,5 \times 10^{16}$ кг.

Схема области низкоэнергичных ионов вблизи Марса, по измерениям на АМС "Марс-2, -3 и -5". Прерывистые линии – участки орбит, на которых зарегистрированы эти ионы, пунктир – примесь ионов в обтекающем потоке, прямые пунктирные линии – границы потока ионов. Во врезке – спектры ионов в обтекающем потоке и в хвосте Марса, по данным анализаторов прибора РИЭП-2801.

За 4,5 млрд. лет Марс должен был потерять $4,3 \times 10^{16}$ кг воды, как показывают современные исследования с помощью прибора АСПЕРА-2. На уносимый СВ атом кислорода приходится два уносимых атома водорода, то есть Марс теря-

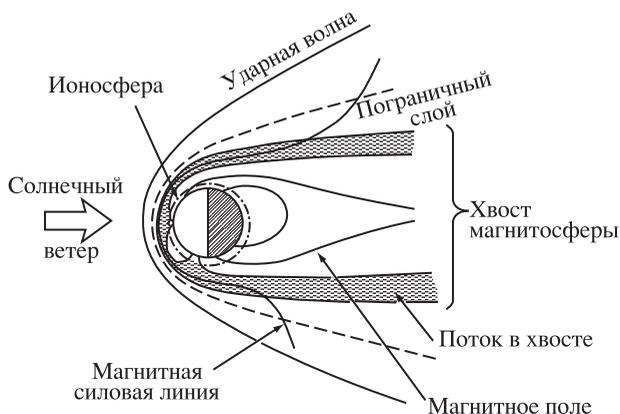
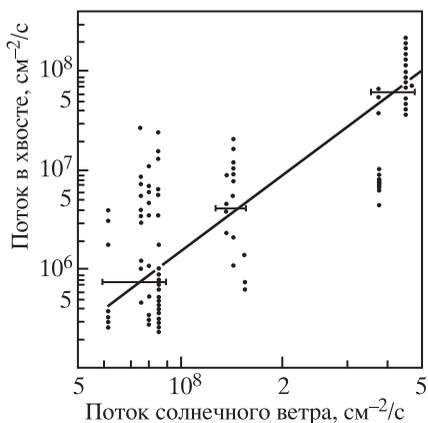


Диаграммы время – энергия для легких и тяжелых ионов при прохождении ИСМ “Марс-5” на фланге области оттекания Марса 20 февраля 1974 г. (а); модуль и азимут магнитного поля (б). Вертикальными линиями выделены три участка полета “Марса-5”.

ет воду. Ввиду того что солнечная активность была выше в ранней стадии формирования Солнечной системы, полные атмосферные потери Марса еще существеннее. Солнечный ветер сыграл решающую роль в эволюции атмосферы Марса и потере им воды. Тема атмосферных по-

терь Марса становится очень актуальной, особенно в последние годы, когда его активно исследуют.

Большой интерес научной общественности к Марсу отмечен на международной конференции “Взаимодействие солнечного ветра с планетами Меркурий, Венера



и Марс”, проводившейся в Москве 17–21 ноября 1975 г. В ней участвовало большинство научных сотрудников, занимавшихся исследованием Марса, Венеры и Меркурия. Ученые СССР, внесшие значительный вклад в исследование Марса, имели возможность принять у себя выдающихся ученых из других стран. Успех этой конференции связан с тем, что наша страна была лидером в космических исследованиях планет.

Более детальные исследования внешней оболочки Марса проводились на ИСМ “Фобос-2” (СССР) и “Марс Экспресс” (ESA). На “Фобосе-2” были установлены приборы ТАУС (разработчик К.И. Грингауз) и АСПЕРА (Р. Лундин, Швеция). Измерения ионного состава с помощью сканирующего анализатора АСПЕРА показали преобладание кислорода в хвосте Марса. По данным измерений определена ско-

рость потери Марсом атмосферы – 2×10^{25} ионов в секунду. Изучение с помощью прибора ТАУС обтекания солнечным ветром Марса подтвердило, что в хвосте Марса доминируют тяжелые ионы. По данным этого прибора, оценка средней величины потерь, индуцированных СВ, составила 2×10^{25} ионов в секунду.

Продолжавшийся в течение многих лет спор о том, имеет ли Марс собственное магнитное поле, разрешился после исследований планеты в 1997–2007 гг. ИСМ “Марс Глобал Сервейер”. Измерения с низкой орбиты с помощью магнитометра группой М. Акунья (США) показали, что у Марса нет собственного планетарного магнитного поля. Но в Южном полушарии есть довольно сильные магнитные аномалии, которые могут оказывать влияние на взаимодействие обтекающего потока в поясе долгот 120–240°. По первым со-

Диаграмма измерения плотности потока тяжелых ионов в хвосте Марса прибором РИЭП-2801 в зависимости от величины потока солнечного ветра. Схема структуры обтекания СВ магнитосферы Марса.

общениям экспериментаторов после выхода “Марс Глобал Сервейер” на орбиту искусственного спутника Марса NASA ошибочно разместила на своем сайте информацию, что зарегистрировано собственное магнитное поле Марса. Автор тут же написал профессору Института геофизики и планетной физики Калифорнийского университета (Лос-Анджелес) К. Расселу: “Как же мы, такие дураки, не смогли заметить этого собственного марсианского магнитного поля?” (Мы с ним были убеждены, по результатам наших исследований, что у Марса нет собственного магнитного поля). Бук-

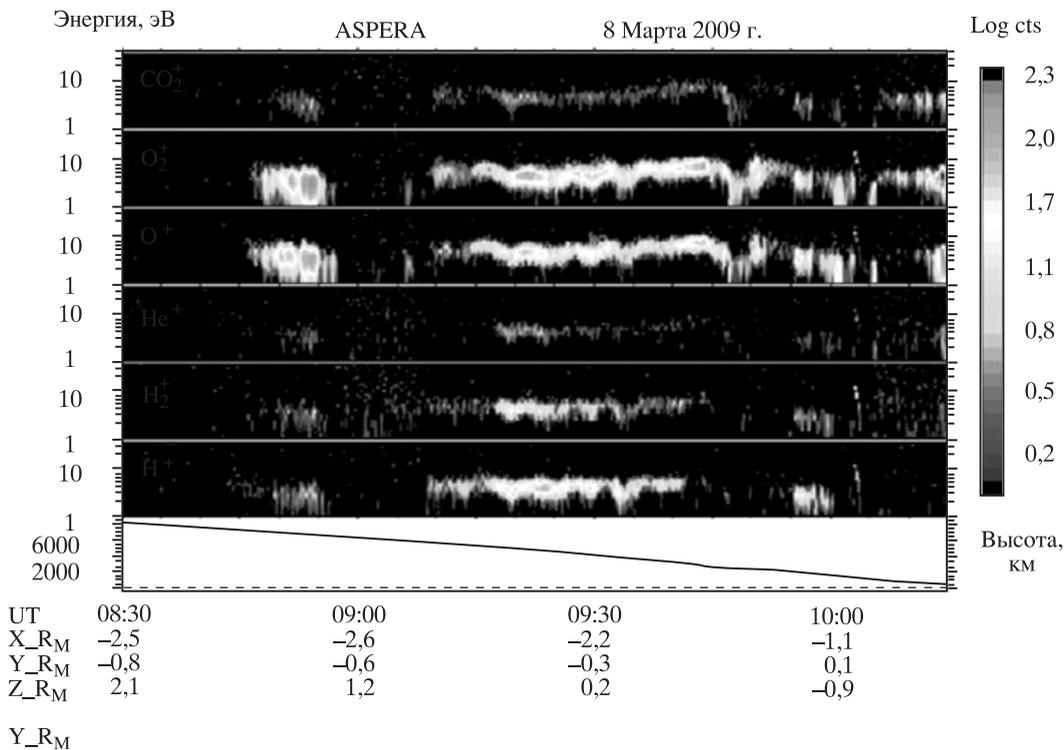


Участники конференции “Взаимодействие солнечного ветра с планетами Меркурий, Венера и Марс” (17–21 ноября 1975 г.). Сидят: Дж. Спрайтер (США), О.Л. Вайсберг, А. Десслер (США), Г. Бридж (США), М. Изаков, Т.Н. Бреус, И.М. Подгорный, О.М. Белоцерковский, В. Шабанский, Н. Несс (США), Н. Жигулёв, Ш.Ш. Долгинов, А.С. Липатов, К.И. Грингауз, З. Бауер (Австрия). Стоят: А.А. Галеев, Н.С. Савич, Л.Н. Жузгов, С.А. Романов, Е.Г. Ерошенко, Г.Н. Застенкер, Л.М. Зелёный, Э.П. Дубинин, А.В. Богданов, В.Н. Смирнов, В.Я. Митницкий и П. Клотье (США).

важно через несколько дней исчезло сообщение о собственном магнитном поле Марса. А вскоре появились публикации об открытии магнитных аномалий на Марсе. Анализ данных магнитных измерений на ИСМ “Марс Глобал Сервейер” показал, что в Южном полушарии Марса есть магнитные аномалии, которые остались после того, как собственное магнитное поле Марса исчезло.

Выведенная на орбиту искусственного спутника Марса в конце 2004 г. АМС “Марс Экспресс” функционировала 10 лет. Длительные исследования ускоренных тяжелых ионов в ближнем хвосте Марса позволило С. Барабашу (Швеция) и его коллегам определить средний состав убегающих ионов: O^+ – 41%, O_2^+ – 38,5%, CO_2^+ – 20,5%. Один из самых интересных результатов исследова-

ний на АМС “Марс Экспресс” – обнаружение Р. Лундиным (Швеция) и его коллегами истечения ионосферных ионов с ночной стороны Марса. Оказалось, что этот источник потерь составляет во время минимума солнечной активности всего 5×10^{24} тяжелых ионов в секунду, но в период максимума солнечной активности достигает $1,4 \times 10^{26}$ частиц в секунду. Измерения



плотности потока ионов в хвосте проведены на искусственных спутниках Марса, и по ним определены общие потери, индуцированные СВ. Скорость потерь атмосферой Марса увеличивается примерно на порядок во время высокой солнечной активности.

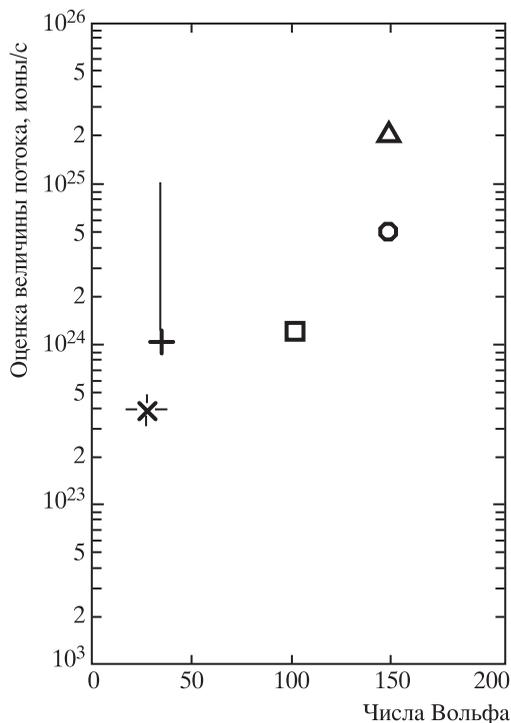
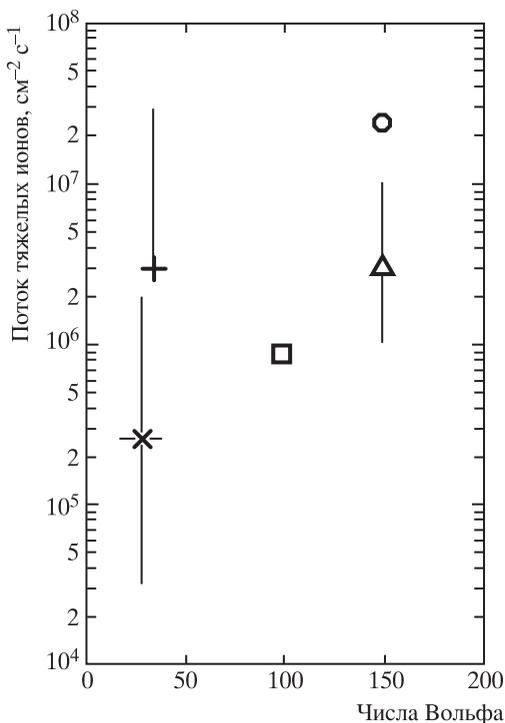
Выполненные до настоящего времени исследования с помощью искусственных спутников Марса позволяют сделать убедительное заключение о важной роли СВ в эволюции атмосферы Марса. В современных условиях она не способна защитить будущих поселенцев, в отличие от Земли, где магнитное поле и плотная

атмосфера защищают живые организмы от губительной радиации.

Осознание роли СВ в формировании атмосферы Марса способствует дальнейшему развитию в исследованиях ее структуры и эволюции. Для решения этих задач 22 сентября 2014 г. АМС «MAVEN» (США) с новейшей научной аппаратурой вышла на орбиту искусственного спутника Марса. За «MAVEN» последовал индийский ИСМ «Мангальян» с приборами для исследования Марса, его атмосферы и атмосферных потерь (Земля и Вселенная, 2014, № 2, с. 50–52, 62–63; 2015, № 1, с. 51–52). К сожалению, россий-

Спектрограммы время – энергия низкоэнергичных ионов CO₂⁺, O₂⁺, O⁺, He⁺, H₂⁺, H⁺ с энергией менее 50 эВ, вытекающих из ионосферы Марса. Внизу – высота орбиты ИСМ «Марс Экспресс» (ESA) 8 марта 2009 г., под ней – универсальное время и три координаты спутника «Марс Экспресс». Справа – шкала логарифма скорости счета ионов. По данным Р. Лундина (Швеция).

ская АМС «Фобос-Грунт», одной из задач которой было исследование роли влияния СВ на верхнюю атмосферу Марса, потерпел аварию при запуске в 2011 г. (Земля и Вселенная, 2011, № 4; 2012, № 2, с. 106–107). Осознание роли СВ в формиро-



⊕ «Марс-5» (РИЭП)

△ «Фобос-2» (ASPERA)

○ «Фобос-2» (ТАУС)

× «Марс Экспресс»

□ Оценка по модели Зелёного - Вайсберга

Диаграммы плотности потока тяжелых ионов в хвосте Марса и вычисленные по этим данным их потери.

вании атмосферы Марса способствует дальнейшему развитию исследований ее структуры и эволюции.

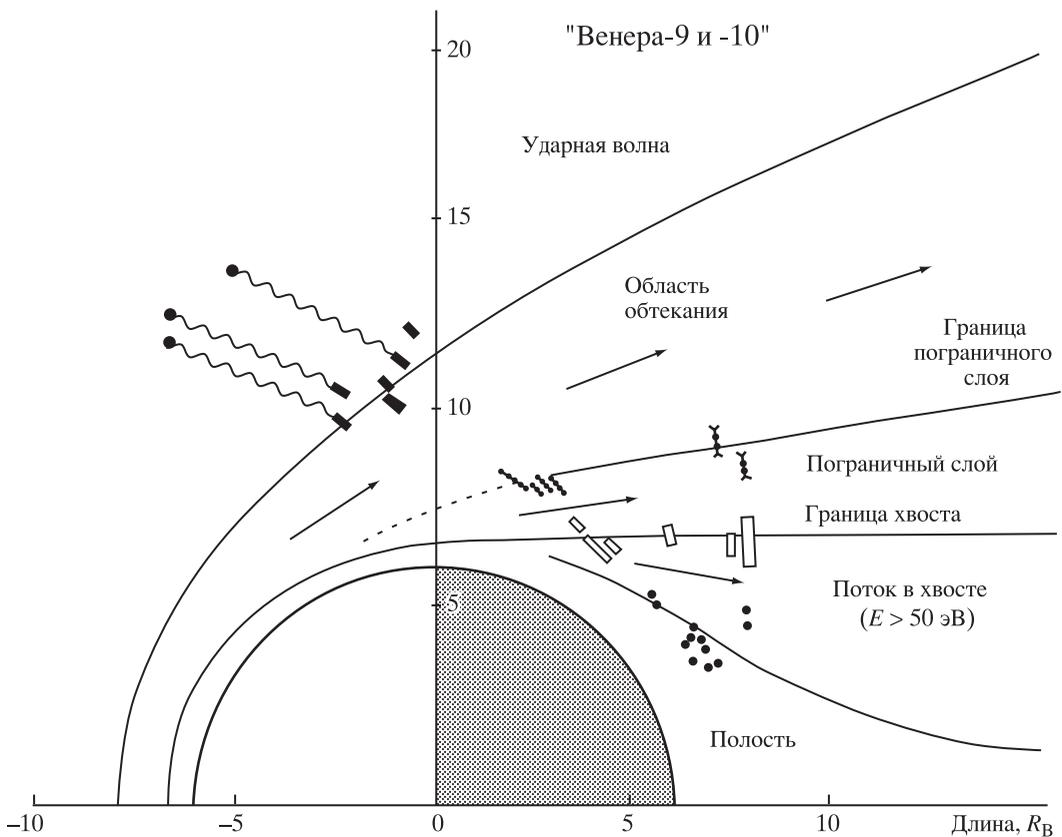
ИССЛЕДОВАНИЕ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА
С ВЕНЕРОЙ

После эпизодических измерений на пролетных и посадочных космических аппаратах в 1962–

1974 гг. систематические исследования взаимодействия СВ с Венерой проводились на советских искусственных спутниках Венеры «Венера-9 и -10» в 1975–1976 гг. (Земля и Вселенная, 1976, № 3). Эксперименты по измерению магнитного поля и плазмы проводили те же группы ученых, что и на первых спутниках Марса. Структура области взаимодействия СВ с Венерой оказалась удивительно похожей на область взаимодействия СВ с Марсом: пограничный слой с примесью планетных ионов в области обтекания планеты

СВ и хвост с потоком планетных ионов. Известно, что Венера не обладает собственным магнитным полем, которое оказывает влияние на обтекание планеты СВ. На АМС «Пионер Венера-1» (США) с перицентром орбиты, проходившей на малой высоте от поверхности Венеры, удалось установить, что оно не превышает 2 нТл.

Измерения на АМС «Венера-9 и -10» и особенно на АМС «Пионер Венера-1» (1979–1993), а также на ИСВ «Венера Экспресс» (2006–2014) позволили тщательно изучить внешнюю оболочку планеты. Детальность и



объем исследований аналогичного марсианскому типу взаимодействия с солнечным ветром уточнили многие его подробности. В частности, оказалось, что направление магнитного поля в хвосте Венеры контролируется направлением перпендикулярного потоку СВ компонента межпланетного магнитного поля. Это соответствует “драпировке” магнитного поля из-за торможения потока СВ перед препятствием и вмороженности магнитного поля в плазму.

Другой важный результат получен на ИСМ “Пионер Венера-1” во

время исследования ионосферы и магнитного поля на дневной стороне Венеры. Обнаружено, что магнитное поле не проникает в ионосферу Венеры при среднем и малом давлении СВ. Как показал К. Рассел (США) с коллегами, над дневной ионосферой образуется магнитный барьер, то есть область повышенного магнитного поля, магнитное давление в котором приблизительно равно давлению СВ. В магнитном барьере у Венеры присутствует небольшое количество низкоэнергичной плазмы, наподобие той, что

Схема плазменных границ в области взаимодействия СВ с Венерой: ударная волна, внешняя граница пограничного слоя в обтекающем потоке с примесью планетарных ионов, тонкая граница плазменного хвоста между обтекающим потоком СВ и потоком планетарных ионов в хвосте. Показана область ускоренных планетарных ионов в хвосте. Данные прибора РИЭП-2801М лаборатории О.Л. Вайсберга.

наблюдалась у внешней границы препятствия у Марса. Стало ясно, что хвост и поток планетарных ионов в хвосте – это продолжение магнитного барьера. Для понимания



Магнитное поле в хвосте Венеры: 1 – полярность магнитного поля в проекции на плоскость, перпендикулярную потоку СВ с горизонтальной осью вдоль направления межпланетного магнитного поля; 2 – направление магнитного поля в плоскости, содержащей направление магнитного поля и ось X , направленную на Солнце (Е.Г. Ерошенко и др.); 3 – диаграмма профиля ионосферной концентрации (точки) и величина магнитного поля на дневной стороне Венеры (“Пионер Венера-1”).

строения магнитосферы Венеры было существенно то, что ширина спектра энергии и толщина слоя, в котором наблюдаются эти ионы, больше на высоких магнитных широтах, чем на низких.

В 2007–2015 гг. АМС “Венера Экспресс” исследовала взаимодействие СВ с Венерой и происходящие в верхней атмосфере Венеры явления в различные фазы солнечного цикла. Эти исследования подтверди-

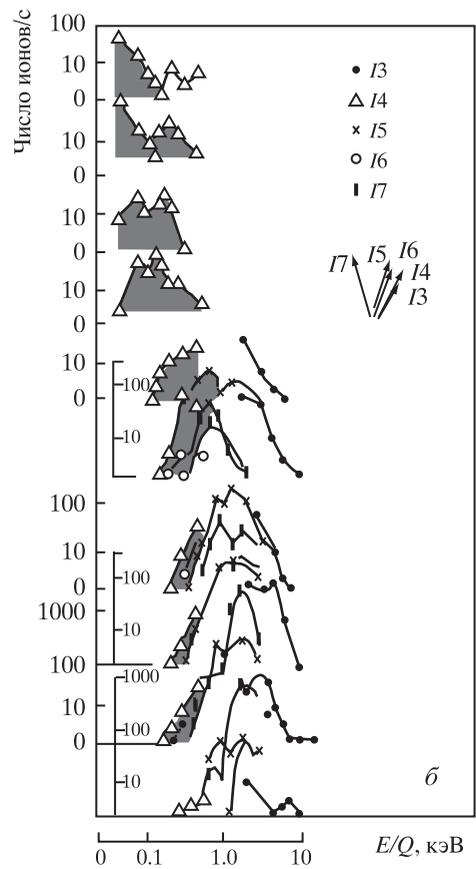
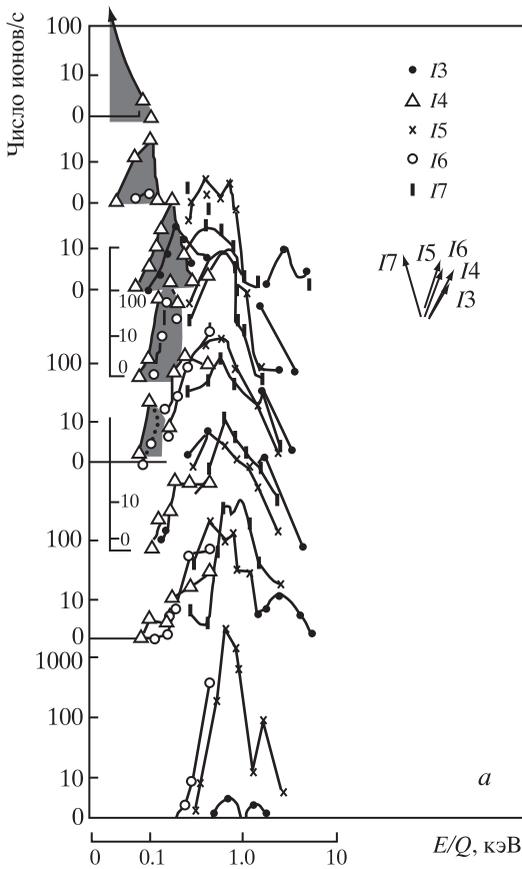
ли главные результаты предыдущих экспериментов и позволили более детально исследовать вариации магнитосферы Венеры при различных условиях в СВ.

МОДЕЛЬ АККРЕЦИОННОЙ МАГНИТОСФЕРЫ

С учетом разных орбит спутников Марса и Венеры и большего объема информации, полученной искусственными спутниками Венеры, можно было составить общую картину взаимодействия СВ с атмосферой немагнитной планеты и свойств ее магнитосферы. В 1984 г. О.Л. Вайсберг и Л.М. Зелёный создали модель магнитосферы Венеры, которая также описывает структуру магнитосферы Марса. Модель опирается на представление о магнитном барьере как препятствии замагниченному потоку СВ, но дополняется нагружением этого потока планетарными ионами при ионизации солнечным ультрафиолетовым излучением

(и рядом других процессов) атомов верхней атмосферы планеты.

Итак, затормозившиеся под нагрузкой тяжелых планетных ионов силовые магнитные трубки формируют дневную часть магнитосферы планеты и тем самым образуют препятствие сверхзвуковому потоку СВ. В результате перед планетой образуется отошедшая ударная волна, как и перед магнитосферой магнитной планеты. Так как магнитное поле не может долго накапливаться на дневной стороне планеты, нагруженные магнитные трубки дрейфуют на фланги планеты и затем в хвост вместе с тяжелыми атмосферными ионами. Образуется, как обычно говорят, индуцированная магнитосфера, которая была открыта на АМС серий “Марс” и “Венера”. Правильнее называть ее аккреционной магнитосферой, поскольку она возникает за счет захвата и уноса от планеты части ее ат-



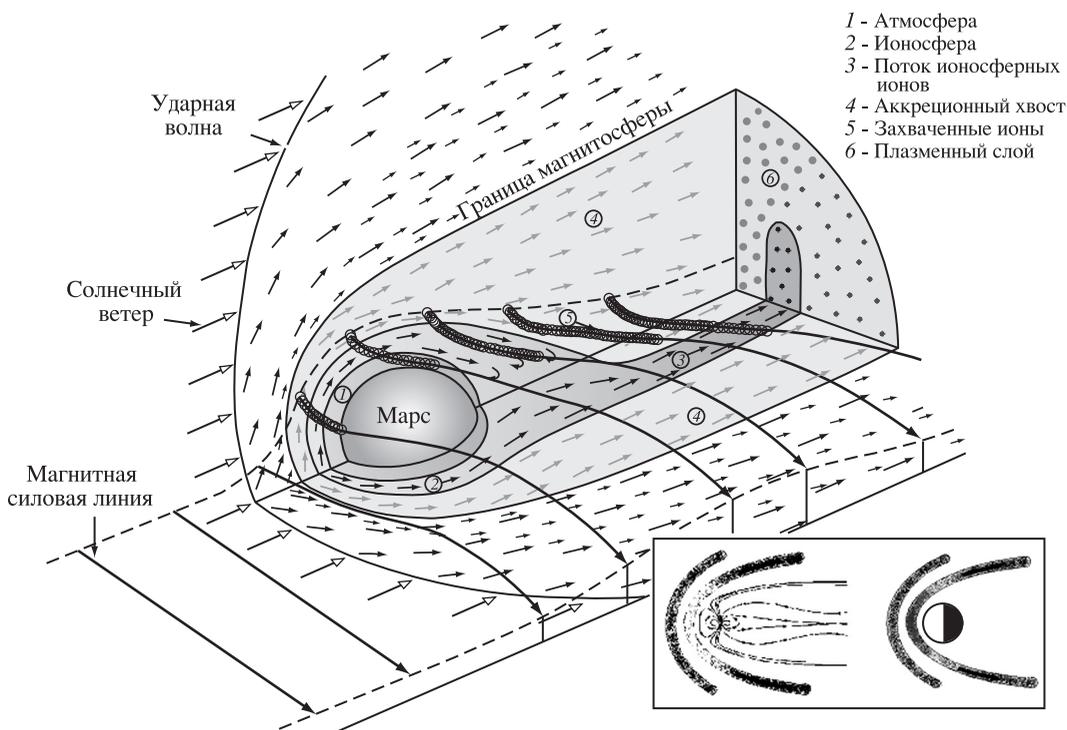
мосферы. Мы предложили способ определения размера такой магнитосферы на основе количественных данных о внешней атмосфере (экзосфере) планеты или на основе количества выделяемых кометами газов. В модели был предложен метод расчета поперечного размера аккреционной магнитосферы по данным о плотности верхней атмосферы планеты, который для Марса и Венеры дает величины, согласующиеся с наблюдаемыми размерами. В 1984 г., за два года до исследований кометы АМС

“Вега-1 и -2” и “Джотто” (ESA), с использованием этой модели мы рассчитали размер плазменной оболочки кометы Галлея (150 тыс. км), который хорошо соответствовал величине, полученной при наблюдении этой оболочки космическими аппаратами в 1986 г. (Земля и Вселенная, 1986, №№ 4, 5).

Выдающиеся конструкторы космической техники Сергей Павлович Королёв и Георгий Николаевич Бабакин и их коллеги предоставили в 1960–1980-х гг. нашим ученым большие возмож-

Диаграммы энергетических спектров ионов от ударной волны через область обтекания и затем через хвост Венеры, зарегистрированные прибором РИЭП-2801М на ИСМ “Венера-10”: а) низкие магнитные широты вблизи пересечения линии вектора магнитного поля диска Венеры, б) высокие магнитные широты вблизи пересечения вертикальной линии диска Венеры.

ности для исследования планет Солнечной системы. Мы гордимся результатами планетных исследований, выполненных на советских АМС и за-



Модель магнитосферы немагнитной планеты, имеющей развитую атмосферу. Во врезке – магнитный барьер перед магнитосферой и магнитный барьер перед атмосферой. О.Л. Вайсберг и Л.М. Зелёный, 1984 г.

ложивших фундамент сегодняшних знаний в этой области.

Проведенные к настоящему времени исследования взаимодействия СВ с Марсом и Венерой

дали возможность перейти от достаточно общих представлений о влиянии СВ на атмосферы планет, не обладающих собственным магнитным полем, к знаниям о многих процессах, происходящих при этом взаимодействии. Наиболее важный результат – познание неизвестного ранее явления: образование аккреционных (индуцированных) магнитосфер. Установлена исключительно важная роль СВ в эволюции

планетных атмосфер. Запуск в 2014 г. к Марсу АМС “MAVEN” (США) и “Мангальян” (Индия) свидетельствует о том, что изучение влияния солнечной активности на атмосферы планет не потеряло своей актуальности. Можно ожидать, что в будущем мы узнаем еще много нового о процессах, влияющих на планеты, а российские инженеры и ученые продолжают принимать активное участие в этих исследованиях.