

УДК 523.72:523.43

В. В. Безруких, М. И. Веригин, Н. М. Шютте

К ВОПРОСУ ОБ ОБНАРУЖЕНИИ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ В ОБЛАСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА С ПЛАНЕТОЙ МАРС

В работах [1–4] сообщалось, что данные измерений ионных потоков, полученные с помощью прибора РИЭП на спутнике «Марс-5», можно интерпретировать как обнаружение потоков тяжелых ионов в области взаимодействия солнечного ветра с планетой Марс. Проведенный в этой статье дополнительный анализ работы прибора в обсуждаемом эксперименте показал, что все особенности экспериментальных данных находят свое объяснение при наличии в этой области ионов только одной массы и не требуют для своего объяснения привлекавшейся в [1–4] гипотезы о существовании потоков тяжелых ионов.

В работах группы исследователей, проводивших измерения характеристик малоэнергичной плазмы с помощью прибора РИЭП на спутнике «Марс-5», сообщалось, что данные измерений ионных потоков в области взаимодействия солнечного ветра с планетой Марс можно интерпретировать как обнаружение потоков тяжелых ионов в этой области [1–4]. Однако, как следует из [1–4], этот вывод был получен не в результате целенаправленного эксперимента, предусматривающего определение массы регистрируемых ионов, а при анализе возможных причин различия показаний двух независимых датчиков прибора РИЭП в области взаимодействия планеты с солнечным ветром. Так как обнаружение потоков тяжелых ионов в этой области имеет весьма серьезное значение для понимания физических процессов, происходящих при взаимодействии солнечного ветра с планетами со слабым магнитным полем, то представляется целесообразным дополнительно проанализировать работу датчиков в обсуждаемом эксперименте. Как показано ниже, такой анализ позволяет дать иную, чем у авторов [1–4], интерпретацию наблюдавшихся эффектов.

Рассмотрим кратко постановку эксперимента и основные, полученные в нем данные. Для измерения энергетических ионных спектров в диапазоне от сотен электроновольт до нескольких килоэлектронвольт в качестве датчиков использовались два независимых остронаправленных электростатических анализатора А (450÷4300 эв) и В (280÷2850 эв) [2, 4], на выходе которых были установлены каналовые электронные умножители (КЭУ). На вход КЭУ подавалось ускоряющее ионы напряжение $U_0 \approx -3,6$ кВ [5], эффективность регистрации ионов КЭУ, работавшими в счетном режиме, во время полета из-за эффекта «утомления» уменьшалась [3], и на околомарсианской орбите оба датчика работали в ненасыщенном режиме [1,3,4].

Внутри области взаимодействия солнечного ветра с планетой энергетические ионные спектры, полученные при помощи датчиков А и В, часто отличались как по форме, так и по величине сигнала. На рис. 1 в [1] (см. также рис. 3 в [2], рис. 13 в [4]) приведен пример последовательности энергетических спектров, полученных в этой области 20.II 1974 г. с 01^h26^m по 01^h48^m на расстоянии ~6000 км от линии Солнце — Марс в антисолнечной части околомарсианского пространства. Для объяснения наблюдавшегося различия спектров, зарегистрированных датчиками В и А

в области взаимодействия солнечного ветра с Марсом (см. рис. 1 в [1]), авторы [1-4] предположили, что за время полета режим работы КЭУ датчиков А и В мог измениться следующим образом: КЭУ В стал работать в режиме, когда его эффективность к тяжелым ионам стала малой по сравнению с эффективностью этого КЭУ к легким ионам (водород, гелий); эффективность регистрации КЭУ А легких и тяжелых ионов осталась примерно одинаковой. В этом случае различие спектров можно объяснить изменением ионного состава окружающей плазмы.

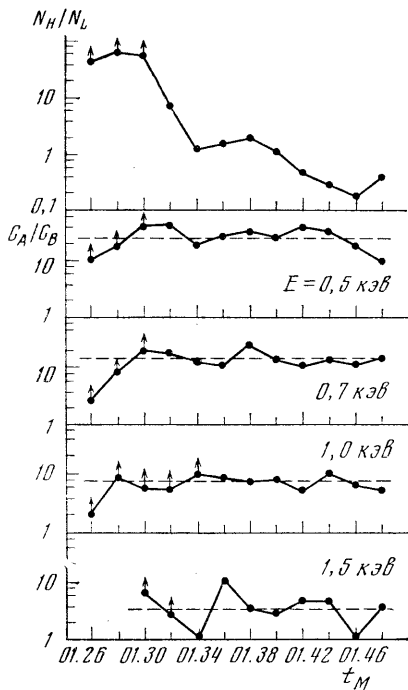


Рис. 1. Оценка отношения потока тяжелых ионов к потоку легких N_H/N_L согласно [1, 3, 4] и построенное по данным рис. 1 из [1] отношение скоростей счета C_A/C_B анализаторов А и В

рис. 1) происходит значительное изменение ионного состава среды (тяжелые ионы заменяются легкими), то в этом интервале должно уменьшаться отношение скоростей счета датчиков C_A/C_B при фиксированной энергии. По приведенным на рис. 1 в [1] данным, при условии, что скорости счета C_A и C_B при любой энергии E можно получить, используя проведенные на этом рисунке плавные кривые, на рис. 1 построена зависимость от времени отношения C_A/C_B для четырех фиксированных энергий: $E=0,5; 0,7; 1,0; 1,5$ кэВ (здесь и далее зарядовое число ионов полагаем равным единице). Штриховой линией на рисунке показано среднее значение C_A/C_B для каждой энергии.

Как видно из рис. 1 за время $01^h26^m-01^h48^m$ для всех выбранных значений E отношение скоростей счета C_A/C_B практически не меняется. Поэтому либо за это время не изменялся ионный состав плазмы, вопреки выводу, сделанному в анализируемых работах [1-4], и оценкам отношения потоков тяжелых и легких ионов на верхнем графике рис. 1, либо датчики не работали в предполагаемом авторами [1-4] режиме. В последнем случае полученные в эксперименте данные в принципе не позволяют делать вывод об изменении ионного состава плазмы.

Таким образом, вывод об обнаружении потоков тяжелых ионов в области взаимодействия солнечного ветра с Марсом, сделанный по данным прибора РИЭП на «Марсе-5», нам представляется недостоверным. В то же время, наблюдавшееся в эксперименте [1-4] расхождение ионных

На верхнем графике рис. 1 приведена взятая из [1,3,4] оценка отношения потока тяжелых ионов N_H к потоку легких ионов N_L для спектров, представленных на рис. 1 в [1]. Как видно из графика, по этим оценкам за интервал времени $01^h26^m-01^h48^m$ отношение N_H/N_L уменьшилось по крайней мере в $200 \div 400$ раз.

Лабораторные измерения, проведенные после полета, и, следовательно, с другими экземплярами КЭУ показали принципиальную осуществимость описанных выше режимов работы датчиков [1-4]. Однако существует возможность непосредственно по данным РИЭП, полученным со спутника, проверить, осуществлялся ли в окрестности Марса предполагаемый в [1-4] режим работы КЭУ.

Действительно, если эффективность регистрации КЭУ В тяжелых ионов мала по сравнению с эффективностью регистрации им легких ионов и если в интервале времени $01^h26^m-01^h48^m$ (см.

энергетических спектров в области взаимодействия солнечного ветра с Марсом нетрудно объяснить за счет зависимости относительной эффективности регистрации ионов КЭУ А и В от энергии ионов E .

Как видно из рис. 1, с ростом E среднее значение отношения C_A/C_B уменьшается. По этим данным на рис. 2, а построена зависимость от E величины, обратной среднему значению C_A/C_B , которую можно интерпретировать как приближенную зависимость от энергии ионов эффективности КЭУ в $f_B(E)$ по отношению к эффективности КЭУ А $f_A(E)$ в реальных режимах работы КЭУ на околомарсианской орбите. Зависимости $f_B(E)/f_A(E)$ на рис. 2, а действительно будет отвечать уменьшение расхождения

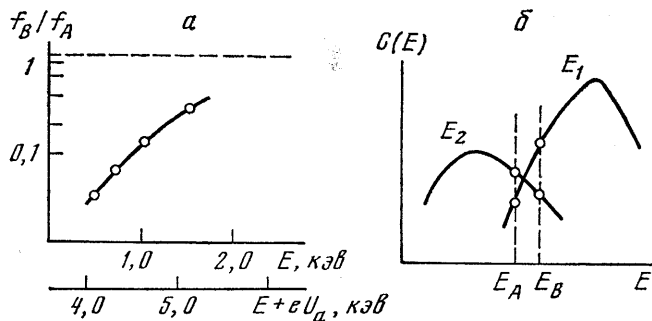


Рис. 2. Зависимость относительной эффективности датчиков В и А $f_B(E)/f_A(E)$ от энергии регистрируемых ионов E (а) и уменьшение отношения скоростей счета анализатора $C(E_B)/C(E_A)$ при уменьшении энергии направленного движения ионов $E_2 < E_1$ (б)

зарегистрированных с 01^h26^m по 01^h48^m датчиками А и В ионных спектров (см. рис. 1, в [1]), так как за это время средняя энергия ионов в окружающей спутник плазме увеличивается (см. показания датчика А на рис. 1 в [1]) и максимум их функции распределения переходит в область энергий, где эффективность датчиков В и А приближаются друг к другу (рис. 2, а).

На дополнительной оси на рис. 2, а отложена также ожидаемая энергия $E + eU_a$, которую ион имеет на входе КЭУ. Крутая зависимость относительной эффективности двух КЭУ от $E + eU_a$ в диапазоне энергий $4 \div 5$ кэв представляется маловероятной [6,7]. Однако следует помнить, что, во-первых, приводимые в литературе данные характеризуют работу КЭУ в режиме насыщения, так как ненасыщенный режим для регистрации импульсов обычно не используется, а во-вторых, зависимость f_A/f_B от E построена для конкретных приборов в конкретных условиях их работы на спутнике по переданным с околомарсианской орбиты данным и, следовательно, достоверна.

Способ анализа результатов измерений, заключающийся в изучении поведения отношения скоростей счета датчиков А и В при фиксированной энергии ионов, сам по себе очевиден и с некоторыми методическими различиями был применен ранее в [4]. Однако выводы [4] о том, что среднее отношение скоростей счета датчиков А и В зависит от местоположения спутника в области взаимодействия Марса с солнечным ветром и что различие спектров, зарегистрированных датчиками А и В, не вызвано изменениями характеристик использованных КЭУ при изменениях энергий частиц (рис. 2, а), противоположны сделанным выше выводам. Остановимся подробнее на причинах различия сделанных выводов.

В отличие от описываемого выше анализа, в [4] C_A и C_B сравнивались только при энергии ионов ~ 1 кэв, что вообще позволяет не делать заключение об энергетических зависимостях характеристик КЭУ; сравнение проводилось не для скоростей счета датчиков А и В, приведенных к од-

ной энергии, а для скорости счета C_A' , настроенного на энергию $E_A \approx 1,07$ кэв датчика А, и скорости счета C_B' , настроенного на энергию $E_B \approx 1,09$ кэв датчика В [4]. Зависимость C_B' от C_A' по данным РИЭП в окрестности Марса 20.II 1974 г. приведена на рис. 14 в [4]. Как видно из этого рисунка, среднее значение отношения скоростей счета датчиков в солнечном ветре $(C_A'/C_B')_1 \approx 1,9$; в области взаимодействия солнечного ветра с Марсом (переходный слой за фронтом ударной волны и более близкие к планете области) для основного числа экспериментальных точек это отношение увеличивается до $(C_A'/C_B')_2 \approx 3 \div 10$ (точки лежат в пределах $1,5 \leq (C_A'/C_B')_2 \leq 20$), т. е. в $1,5 \div 5$ раз. Однако отмеченное увеличение C_A'/C_B' нельзя непосредственно интерпретировать как увеличение в рассматриваемой области отношения скоростей счета датчиков при фиксированной энергии. Именно такое поведение отношения C_A'/C_B' , настроенных на разные энергии ($\delta E = E_B - E_A > 0$) датчиков, и следует ожидать вблизи планеты, так как при приближении к ней энергия направленного движения ионов уменьшается. На рис. 2, б, качественно иллюстрирующем это соображение, сплошными кривыми показана зависимость от энергии скорости счета $C(E)$ датчика, имеющего единичную эффективность при двух значениях энергии направленного движения ионов $E_2 < E_1$. Увеличение отношения $C_A'/C_B' = [f_A(E_A)/f_B(E_B)] [C(E_A)/C(E_B)]$ с уменьшением энергии направленного движения ионов из этого рисунка очевидно. Оценим этот эффект количественно.

Отношение скоростей счета $(C_A'/C_B')_1$ в солнечном ветре при температуре ионов T_1 и энергии их направленного движения E_1 можно записать в следующем виде:

$$(C_A'/C_B')_1 = f_A(E_A)/f_B(E_B) (E_A/E_B)^2 \exp((\sqrt{E_A} - \sqrt{E_1})^2 - (\sqrt{E_B} - \sqrt{E_1})^2)/T_1). \quad (1)$$

Выражение (1) написано при условии, что вектор переносной скорости ионов перпендикулярен апертуре датчиков. Пренебрегая изменением эффективности регистрации ионов датчиками на интервале энергий δE и учитывая, что $\delta E \ll E = (E_A + E_B)/2 \approx 1,08$ кэв, из (1) получим:

$$(C_A'/C_B')_1 = f_A(E)/f_B(E) (1 - 2\delta E/E) \exp((1 - \sqrt{E_1/E})\delta E/T_1). \quad (2)$$

Используя (2) и аналогичное выражение для отношения $(C_A'/C_B')_2$ в области взаимодействия солнечного ветра с Марсом, где соответствующие параметры ионов равны T_2 и E_2 , получим, что при перемещении спутника в рассматриваемую область C_A'/C_B' увеличится в

$$(C_A'/C_B')_2 / (C_A'/C_B')_1 = \exp(\delta E((\sqrt{E_1/E} - 1)/T_1 + (1 + \sqrt{E_2/E})/T_2)) \quad (3)$$

раз.

На рис. 3 горизонтальной штриховкой в плоскости E, T показана область значений E_1, T_1 , а косой штриховкой — область значений E_2, T_2 — наблюдавшихся, соответственно, в солнечном ветре и в области его взаимодействия с Марсом 19–20.II 1974 г. Области заштрихованы в соответствии с оценками параметров E, T по данным прибора РИЭП (см., например, рис. 4, в [2]). В дальнейшем будем использовать $T_1 \approx 7$ эв и $E_1 \approx 1300$ эв; эти значения показаны звездочкой на рис. 3. Маленькая величина δE , входящая в (3), является разностью двух больших величин энергий E_B и E_A , и поэтому ее значение, реализовавшееся в эксперименте, может отличаться от $\delta E \approx 20$ эв, полученного вычитанием значений E_B и E_A , приведенных в [4]. Реализовавшуюся в эксперименте величину δE можно оценить из соотношения (2), подставив в него среднее значение $(C_A'/C_B')_1$ в солнечном ветре и приближенное значение относительной эффективности КЭУ из рис. 2, а: $f_B(E)/f_A(E) \approx 0,14$ при $E \approx 1,08$ кэв. В этом случае из (2) следует $\delta E \approx 80$ эв.

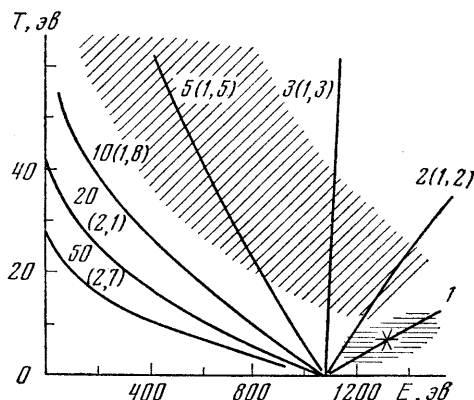
Сплошные кривые на рис. 3 соответствуют постоянным значениям отношения (3) при изменении параметров E_2 и T_2 . Цифры без скобок на

этих кривых показывают величину отношения (3) для данной кривой при $\delta E \approx 80$ эв, а цифры в скобках — при $\delta E \approx 20$ эв. Как видно из рисунка, наблюдавшееся 20.II 1974 г. увеличение отношения C_A'/C_B' в области взаимодействия солнечного ветра с Марсом в $\sim 1,5 \div 5$ раз соответствует увеличению этого отношения, оцененному по формуле (3) при $\delta E \approx 80$ эв.

Покажем, что оцененная выше величина $\delta E \approx 80$ эв не является невозможной в обсуждаемом эксперименте на «Марсе-5». Действительно, энергия ионов, на которую настроен электростатический анализатор А при подаче на его отклоняющие пластины напряжения U , определяется по

Рис. 3. Области значений энергий направленного движения ионов E и температуры T , наблюдавшихся 19–20.II 1974 г. в солнечном ветре (горизонтальная штриховка) и в области его взаимодействия с Марсом (косая штриховка) согласно оценкам [2]

Сплошные кривые — линии постоянного значения отношения скоростей счета C_A/C_B



следующей формуле: $E_A = \mu U$, где $\mu = (2 \ln(R_2/R_1))^{-1}$ — коэффициент выигрыша по энергии, $R_1 = 39$ мм и $R_2 = 41$ мм — радиусы кривизны внутренней и внешней пластин. Точность, с которой были выставлены R_1 и R_2 , составляла $\delta R \pm 0,03$ мм [5], поэтому точность, с которой был известен коэффициент выигрыша, не превышала $\delta \mu / \mu \approx \sqrt{2} \delta R / (R_2 - R_1) \approx 2\%$. Приняв для оценки точность измерения напряжения на отклоняющих пластинах при калибровке $\delta U / U \approx 1\%$, получим, что $\delta E_A / E_B \approx 3\%$, т. е. точность, с которой известна энергия ионов регистрируемых анализатором А $\delta E_A = \pm 30$ эв. Так как $\delta E_B \approx \delta E_A$, то возможность того, что анализаторы А и В были настроены на энергии, отличающиеся до $\delta E \approx 80$ эв, не противоречит приведенным в [4] значениям E_A и E_B .

Таким образом, все особенности экспериментальных данных, полученные при помощи прибора РИЭП в исследованной на «Марсе-5» области взаимодействия солнечного ветра с Марсом, находят свое самосогласованное объяснение при наличии в этой области ионов только одной массы, переносная скорость которых меньше, чем в солнечном ветре, и не требуют для своего объяснения привлечения гипотезы о существовании потоков тяжелых ионов. Прямые экспериментальные данные, свидетельствующие о наличии в рассматриваемой области ионов с более тяжелыми массами, чем ионы солнечного ветра, в настоящее время отсутствуют.

Дата поступления
18 апреля 1977 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. В. Богданов, О. Л. Вайсберг, А. П. Калинин, В. Н. Смирнов. Докл. АН СССР, 225, № 6, 1284, 1975.
2. O. L. Vaisberg, V. N. Smirnov, A. V. Bogdanov et al. In: Space Research, XVI, Akademie — Verlag, Berlin, 1976.
3. O. L. Vaisberg, A. V. Bogdanov, V. N. Smirnov, S. A. Romanov. In: «Solar-Wind Interaction with the Planets Mercury, Venus and Mars», NASA SP-397, Washington, 1976, p. 21.
4. O. L. Vaisberg. Mars: plasma environment. Препринт ИКИ АН СССР, Д-234, М., 1976.
5. М. Р. Айнбунд, А. В. Богданов, О. Л. Вайсберг и др. Космич. исслед., II, № 5, 783, 1973.
6. Н. М. Шютте, Л. П. Смирнова. Электронная техника, сер. 4, вып. 4, 39, 1975.
7. Эджиди и др. Приборы для научных исследований, 40, № 1, 92, 1969.