

УДК 523.4-853

## Воздействие солнечной вспышки на ионосферы Венеры и Земли по данным спутников «Пионер-Венера» и «Dynamics Explorer-B»

Б. Киров<sup>1</sup>, К. Георгиева<sup>1</sup>, Д. Данов<sup>1</sup>, Л. Банков<sup>2</sup>, А. Василева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Центральна лабораторія сонячно-земних зв'язків Болгарської академії наук

<sup>2</sup>Інститут космічних досліджень Болгарської академії наук

Надійшла до редакції 12.06.00

Досліджується реакція іоносфер Венери і Землі на індивідуальні сонячні події — рентгенівський та протонний спалах 30 і 31 січня 1982 р. Використані одночасні дані супутників «Пионер-Венера» і «Dynamics Explorer-B». Ця сонячна протонна подія вибрана тому, що при значеннях орбітальних елементів в цей період вона впливає на обидві планети. Спостережувані відмінності в реакціях двох іоносфер пояснюються фактом, що у Землі є внутрішнє магнітне поле та потужна магнітосфера, а венеріанська магнітосфера індукована магнітним полем сонячного вітру.

В последнее время для понимания явлений в земной ионосфере все чаще используются методы сравнительной планетологии. В настоящей работе исследуется реакция ионосфер Венеры и Земли на индивидуальное солнечное событие — рентгеновскую и протонную вспышку 30 и 31 января 1982 г. Используются одновременные данные спутников «Пионер-Венера» и «Dynamics Explorer-B». Это солнечное протонное событие выбрано потому, что при значениях орбитальных элементов Земли и Венеры в этот период оно оказывает влияние на обе планеты. Наблюдаемые различия в реакциях двух ионосфер объясняются фактом, что у Земли есть внутреннее магнитное поле и мощная магнитосфера, а венерианская магнитосфера индуцирована магнитным полем солнечного ветра.

новский поток  $10^{-4}$  Вт/м<sup>2</sup>, яркая в оптической области с площадью между 12.4 и 24.7 град<sup>2</sup>. В 00<sup>h</sup>55<sup>m</sup> UT 31 января в той же области наблюдалась протонная вспышка с максимумом 830 см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>стер<sup>-1</sup>. Эта вспышка достигла и до Земли, и до Венеры, так как 31 января их координаты в гелиографической координатной системе были следующими: расстояние Земли от Солнца 0.98 а. е.,  $\Phi = -3.4^\circ$ ,  $\Lambda = 341.8^\circ$ ; для Венеры соответственно 0.77 а. е.,  $-5.9^\circ$ ,  $335.3^\circ$ . Гелиографическая система координат центрирована в Солнце, ось X ориентирована вдоль линии пересечения эклиптики и солнечной экваториальной плоскости и вращается с периодом 25.38 сут.; ось Z перпендикулярна к ней и направлена на север от солнечного экватора, а ось Y дополняет правую систему координат.

### СОЛНЕЧНОЕ СОБЫТИЕ

30 января 1982 г. в 23<sup>h</sup>58<sup>m</sup> UT была зарегистрирована солнечная вспышка из области 3576 с координатами S13 E19. Вспышка класса X1/3B — рентге-

### ЗЕМЛЯ

Для исследования реакции земной ионосферы используются данные цилиндрического зонда Ленгмюра [10] и ионного дрейфметра [7] низкопогодей-

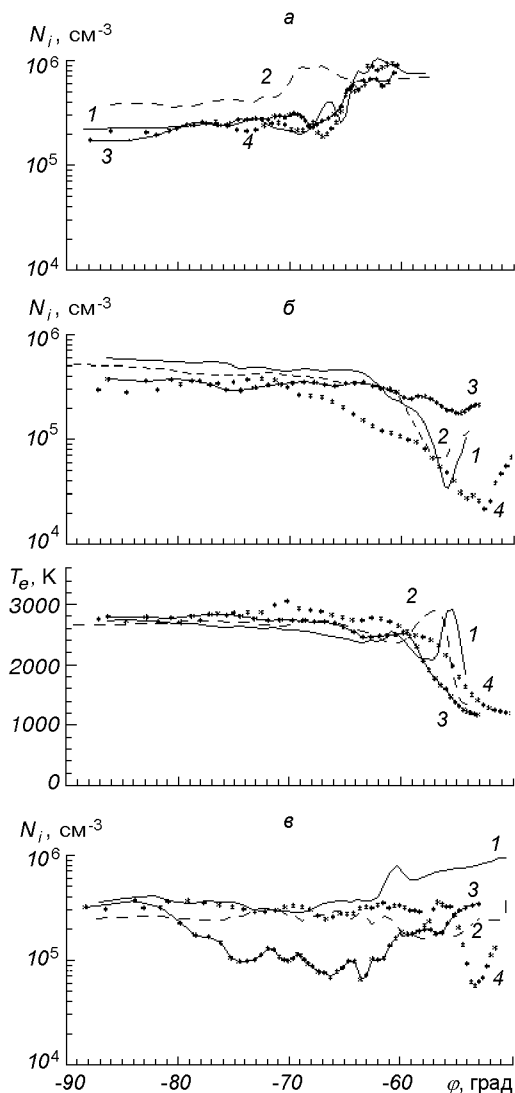


Рис. 1. *а* — Ионная концентрация в освещенной земной ионосфере вдоль орбиты спутника DE: 1 — до солнечной вспышки (6.40—6.60<sup>h</sup> UT, 30 января 1982 г.); 2, 3, 4 — после вспышки 31 января 1982 г. (1.64—1.84<sup>h</sup>, 4.88—5.04<sup>h</sup>, 6.48—6.68<sup>h</sup> UT). Локальное время 14<sup>h</sup>. *б* — Ионная концентрация и электронная температура в ночной земной ионосфере: 1 — до солнечной вспышки (22.60—22.90<sup>h</sup> UT, 30 января 1982 г.); 2, 3, 4 — после вспышки для 0.20—0.50<sup>h</sup>, 1.08—2.05<sup>h</sup>, 3.40—3.70<sup>h</sup> UT). Локальное время 02<sup>h</sup>. *в* — Динамика ночной земной ионосферы после прихода протонов солнечной вспышки: 1 — 11.45—11.70<sup>h</sup>, 2 — 13.10—13.35<sup>h</sup>, 3 — 16.30—16.55<sup>h</sup>, 4 — 22.70—22.95<sup>h</sup> UT

ного спутника «Dynamics Explorer» (DE) [8], сеансы которого в этот период преимущественно в южном полушарии с высотой орбиты между 320 и 400 км, локальное время соответственно 02 и 14 ч.

Реакция дневной высокоширотной ионосферы по-

казана на рис. 1, *а*. Электронная концентрация до солнечной вспышки в полярной шапке составляла около  $2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ , а в области выпадения энергичных частиц — около  $10^6 \text{ см}^{-3}$ . Пунктиром (2) показана концентрация через 2 ч после солнечной вспышки. Рентгеновская вспышка достигает Земли примерно за 8 мин и проникает ниже 100 км. Во время солнечной вспышки рентгеновское излучение является основным источником ионизации в областях D и E. Силовые линии геомагнитного поля в полярной шапке почти вертикальны и открыты относительно силовых линий межпланетного магнитного поля. Давления плазмы в силовых линиях на больших высотах недостаточно для уравнивания избыточного ионосферного источника плазмы, и заряженные частицы свободно поднимаются вверх. В результате рентгеновской вспышки электронная концентрация в области D повышается в несколько раз. Из-за диффузии плазмы вдоль открытых силовых линий и из-за ионизации, порождаемой УФ-излучением, сопровождающим рентгеновскую вспышку, увеличивается и электронная концентрация на высотах F-слоя, где в этот момент находится DE. Концентрация в полярной шапке в 01<sup>h</sup>40<sup>m</sup> UT —  $4 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$  — в два раза больше, чем до вспышки. Подобные эффекты наблюдались и раньше [1]. Наблюдается и некоторое сжатие полярной шапки. Но и сама рентгеновская вспышка, и ее эффекты недолговременны. Как видно из рис. 1, в 05<sup>h</sup> UT ионосфера начала восстанавливать свое прежнее состояние до вспышки.

Поведение концентрации и электронной температуры в ночной ионосфере (02<sup>h</sup> локального времени) прослежено на рис. 1, *б*. Сеанс 1 начинается непосредственно перед солнечной вспышкой. Наблюдается типичное широтное распределение с хорошо развитым провалом в электронной концентрации с максимумом температуры около  $\varphi = 57^\circ$ . Плазма с повышенной концентрацией в результате рентгеновской вспышки и сопутствующей УФ-вспышки переносится конвекцией на ночную сторону и начинает заполнять провал. В 01<sup>h</sup>50<sup>m</sup> UT 31 января концентрация в центре провала становится выше  $10^5 \text{ см}^{-3}$ , и провал почти не замечается, а максимум температуры исчезает. Через два часа, когда концентрация на дневной стороне вернулась к своему уровню до вспышки, провал снова начал оформляться под действием рекомбинации в области медленного движения ионосферной плазмы на границе между противоположно направленными конвекцией и корротацией, но плазма в нем еще не потеплела.

1 февраля 1982 г. в интервале от 09 до 12<sup>h</sup> UT Кр-индекс резко увеличивается от 2+ до 50. В то же

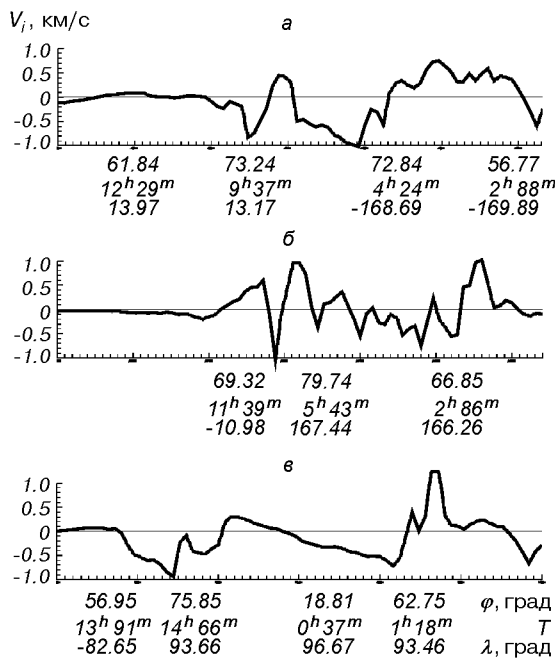


Рис. 2. Скорость ионного дрейфа по данным спутника DE: а — вдоль орбиты рис. 1, в, 2; б — UT 14.35—14.56<sup>h</sup>; в — UT 19.20—19.45<sup>h</sup>

время начинается мощное ионосферное возмущение. Профиль ночной электронной концентрации на высоте DE (около  $F_{max}$ ) показан на рис. 1, в, 1. Ионосферный провал отсутствует и в области, где он ожидался; вместо уменьшения концентрации наблюдается увеличение, причем вдоль всей орбиты концентрация высока. Только часом позже концентрация в области между  $-50^\circ$  и  $-65^\circ$  резко уменьшается, и местами в четыре раза. В то же время дрейфметром DE измерялись очень быстрые (до 1 км/с) и сложно конфигурированные дрейфы (рис. 2, а), которые показывают наличие сильных продольных токов и связаны с изменениями в компонентах межпланетного магнитного поля, т. е. развивающиеся ионосферные возмущения связаны с приходом ударной волны протонной вспышки до Земли. На рис. 2, б показан дрейф через полтора часа. Картина еще сложнее, и ее можно рассматривать как доказательство значительного усложнения эквивалентных токовых систем. Данные еще через три часа (рис. 1, в, 3) показывают, что плазма в зоне около  $\varphi = -50^\circ \dots -60^\circ$  в общем сохраняет свою концентрацию и широтное распределение, а в зоне  $-60^\circ \dots -82^\circ$  наблюдается резкое уменьшение концентрации в несколько раз. Восемь часов после начала возмущения дрейф местами сохраняет свою

скорость (рис. 2, в), но уже намного более структурирован и имеет знакомый по моделям вид, дающий возможность переноса плазмы с освещенной к ночной стороне, формирование застойной зоны и образование ионосферного провала. На рис. 1, в, 4 показана та же зона еще через 3 ч. Плазма в районе  $\varphi = -80^\circ \dots -60^\circ$  восстановила свою плотность, а на  $\varphi = -55^\circ$  образовался ясно выраженный ионосферный провал.

### ВЕНЕРА

С начала космической эры планета Венера исследовалась многими спутниками, в основном серии «Венера» и «Маринер». Не все из них осуществляли измерения ионосферных параметров. Наиболее полные данные получены спутником «Пионер-Венера» [3], который работал дольше одного солнечного цикла — с 1978 до 1982 гг.

Об ионосфере Венеры до полета «Пионер-Венера» было известно очень немного. Вертикальные профили электронной концентрации, измеренные спутником «Маринер-5», показали плотную, но очень тонкую дневную ионосферу и менее развитую, но более толстую ионосферу на ночной стороне. Существование ночной венерианской ионосферы первоначально считалось неожиданным, так как планета обращается около своей оси за 116 земных суток, и ионизация, создаваемая на дневной стороне, должна бы рекомбинировать сразу после захода Солнца. Это предположение, однако, не учитывало ряд факторов: во-первых, атмосфера на уровне облаков, а вероятно и расположенная над ней термосфера, вращается быстрее самой планеты, так что время, в течение которого данный объем атмосферы находится на неосвещенной стороне, уменьшается до четырех земных суток. Во-вторых, что более важно, у Венеры нет внутреннего магнитного поля, которое бы ограничивало поток ионов к ночной стороне. И наконец, в ночной атмосфере выпадают энергичные электроны, которые создают локальную ионизацию [2].

В этой работе представлены данные прибора ОЕТР (Orbiter Electron Temperature Probe) — цилиндрического электростатического зонда для измерения электронной температуры и электронной ионной концентраций, аналогичного цилиндрическому зонду на «Dynamics Explorer» [9].

Ионный ток  $I_i$ , измеряемый зондом, является суммой трех составляющих: тока  $I_{ia}$  ионов окружающей плазмы, фотоэлектронного тока  $I_{pe}$  и тока  $I_{se}$  вторичных электронов, образующегося в результате попадания на коллектор энергичных ионов и

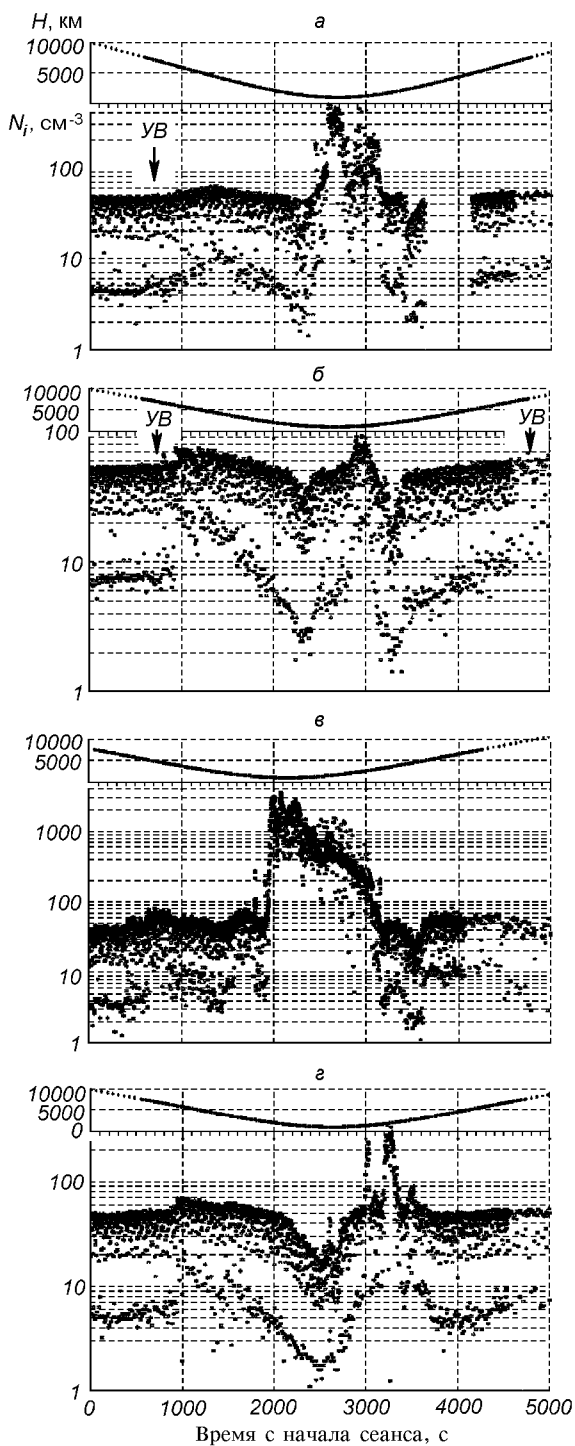


Рис. 3. Спин-модулированная ионная концентрация  $N$  в ночной ионосфере Венеры по данным спутника «Пионер-Венера»: *a* — за день до солнечной вспышки (30 января 1982 г., UT 0.58—2.21<sup>h</sup>); *б* — один сутки после вспышки (1 февраля 1982 г., UT 0.58—2.21<sup>h</sup>); *в* — двое суток после вспышки (2 февраля 1982 г., UT 1.06—2.30<sup>h</sup>); *г* — трое суток после вспышки (3 февраля 1982 г., UT 0.58—2.21<sup>h</sup>). В верхней части рисунков представлена высота  $H$  спутника над поверхностью планеты;  $UB$  — пересечение ударной волны

электронов. В солнечном ветре током вторичных электронов можно пренебречь, а фотоэлектронный ток составляет около  $7 \cdot 10^{-9}$  А, что на один-два порядка больше  $I_{ia}$ . В ионосфере основной вклад дает  $I_{ia}$ .

Спутник «Пионер-Венера» вращается вокруг своей оси, а зонд установлен на штанге, расположенной вдоль радиуса спутника. Поэтому измеряемый ток и вычисляемая по нему ионная концентрация спин-модулированы. В солнечном ветре максимальные значения тока измеряются тогда, когда зонд освещен Солнцем, и соответствуют току фотоэлектронов, а минимальные ( $I_{ia}$ ) — когда зонд находится в тени спутника. В периапсе, когда спутник погружается в ионосферу, амплитуда модуляции (которая здесь обусловлена изменением положения зонда относительно налетающего потока ионов при вращении спутника) резко уменьшается, и максимальные величины тока соответствуют концентрации ионов в окружающей плазме.

Высота периапса спутника «Пионер-Венера» осенью 1980 г. начала увеличиваться от 150 км (в области максимума ионосферной концентрации) до 2300 км в 1986 г. и в начале 1982 г. составляла около 1000 км — в верхней ионосфере. Период оборота — 24 ч, орбита сильно эллиптическая с эксцентриситетом 0.82 и вытянута к Солнцу, так что периапс имел место на ночной стороне около 01<sup>h</sup> UT. Для рассматриваемого периода есть пять последовательных витков спутника «Пионер-Венера»:

1151	— 30.01.1982 г.	UT 00 <sup>h</sup> 58 <sup>m</sup> 20 <sup>s</sup>	— UT 02 <sup>h</sup> 21 <sup>m</sup> 40 <sup>s</sup>
1152	— 31.01	UT 01 <sup>h</sup> 15 <sup>m</sup> 00 <sup>s</sup>	— 02 <sup>h</sup> 38 <sup>m</sup> 00 <sup>s</sup>
1153	— 01.02	UT 00 <sup>h</sup> 58 <sup>m</sup> 20 <sup>s</sup>	— 02 <sup>h</sup> 21 <sup>m</sup> 40 <sup>s</sup>
1154	— 02.02	UT 01 <sup>h</sup> 06 <sup>m</sup> 40 <sup>s</sup>	— 02 <sup>h</sup> 30 <sup>m</sup> 00 <sup>s</sup>
1155	— 03.02	UT 00 <sup>h</sup> 58 <sup>m</sup> 20 <sup>s</sup>	— 02 <sup>h</sup> 21 <sup>m</sup> 40 <sup>s</sup>

У четырех из этих витков почти одинаковые орбитальные параметры, а у пятого (1152) они сильно отличаются, поэтому исключаем его из дальнейшего анализа. Этот виток начался в 01<sup>h</sup>15<sup>m</sup> UT 31 января — через 78 мин после регистрации солнечной вспышки на Земле. Рентгеновское излучение, связанное с ней, достигает Венеры примерно на 1 мин раньше, но поскольку при данном расположении периапса можно исследовать только реакцию ночной ионосферы, а этого времени недостаточно для переноса плазмы с освещенной на неосвещенную сторону, предполагаем, что в ней эффекты вспышки не проявились.

Первый рассматриваемый виток — 1151 — выполнен за день до солнечной вспышки (рис. 3, *a*). Ионная концентрация в солнечном ветре составила 4–5 см<sup>-3</sup>, а в периапсе — около 500 см<sup>-3</sup>. Орбита спутника пересекает ударную волну на высоте

6391 км на дневной стороне и 11939 км на ночной стороне (вне рисунка).

Виток 1153 (рис. 3, б) — выполнен в 01<sup>h</sup> UT 1 февраля, за сутки после солнечного события. Концентрация в ночной ионосфере равна 80—90 см<sup>-3</sup>, что в несколько раз ниже, чем в предыдущем витке. Высота ударной волны составила 6220 км на дневной стороне и 9372 км на ночной. Еще через 24 ч (виток 1154, рис. 3, в) в 1<sup>h</sup> UT 2 февраля концентрация в периапсе повысилась более чем на порядок и достигла  $4 \cdot 10^3$  см<sup>-3</sup>, а на следующий день (виток 1155, рис. 3, г) она восстановилась до уровня перед возмущением — 400 см<sup>-3</sup>.

Предполагается, что ночная ионосфера Венеры поддерживается в основном за счет переноса плазмы с освещенной стороны через терминатор, причем общий поток ионов на ночную сторону равен произведению концентрации, поперечного сечения ионосферы у терминатора и интегрированной по высоте скорости направленного на ночную сторону ионного потока [6]. Во время солнечных вспышек увеличенный поток ионизирующей радиации ведет к повышению концентрации на дневной стороне и к увеличению потока ионов через терминатор на ночную сторону, что повышает ночную концентрацию. С другой стороны, предыдущие исследования [5] показали, что ударная волна и ионопауза реагируют на повышение солнечной активности и во временных масштабах 11-летнего солнечного цикла, и в связи с индивидуальными солнечными событиями. При увеличении динамического давления солнечного ветра высота ионопаузы и ударной волны уменьшается, причем поперечное сечение ионосферы и соответственно поток ионов через терминатор на ночную сторону уменьшаются.

В работе [5] рассмотрены два диапазона высот в ночной ионосфере — от 142 до 600 км («основная ионосфера») и 1400—2500 км (ионный хвост) и установлено, что эти две области реагируют по-разному на увеличение потока крайнего ультрафиолета: концентрация в хвосте увеличивается при повышении потока УФ-радиации, а в основной ионосфере эта зависимость слабо отрицательна. Для рассматриваемого периода высота периапса была около 1000 км — посередине между полученными до сих пор значениями.

Во время конкретного солнечного события ионосфера Венеры была подвержена совместному воздействию двух факторов — солнечной вспышки и связанных с ней потоков фотоэлектронов и протонной вспышки и распространяющейся ударной волны. Общий поток фотонов с длиной волны от  $\lambda = 30$  нм до  $L_\alpha$  31 января и 1 февраля — самый высокий ( $8.6 \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>) в течение всего 1982 года

[8]. Используя эмпирическую модель электронной температуры и концентрации [11] для вычисления скорости переноса ионного потока через терминатор, получаем, что время переноса на ночную сторону плазмы с увеличенной концентрацией в результате дополнительной фотоионизации близко к 37 ч. Ударная волна, связанная с протонной вспышкой, достигает Земли примерно за 33 ч. Если принять скорость распространения постоянной, та же ударная волна должна достичь Венеры на 8 ч раньше, т. е. около 45 мин до измерений спутника в периапсе орбиты 1153 (рис. 3, б). Действительно, высоты ударной волны и ионопаузы, измеренные в обороте 1153, понижены по сравнению со спокойным периодом, и периапс орбиты оказывается в области со значительно меньшей концентрацией. Плазма с повышенной концентрацией с дневной стороны еще не достигла антисолнечной точки (01<sup>h</sup> локального времени). Она достигает ее на полсутки позже, и по крайней мере еще полсутки концентрация на ночной стороне сохраняется высокой, т. е. по реакции к солнечному УФ-излучению область около 1000 км можно причислить скорее к ионному хвосту, чем к основной ионосфере. На рис. 3, в заметно и характерное структурирование хвоста с развитием «дыр» — областей с пониженной концентрацией, в которых установлено наличие вертикальных магнитных полей, индуцированных магнитным полем солнечного ветра. Установлено, что эти магнитные поля ускоряют ионы до скоростей, позволяющих им покинуть ионосферу [4]. Поток ионов O<sup>+</sup>, покидающих ионосферу, равен  $5 \cdot 10^{25}$  с<sup>-1</sup>, что соответствует глобальному среднему потоку  $10^7$  см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>. 2 февраля концентрация на ночной стороне вернулась до спокойного уровня (рис. 3, г).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прослежена реакция на индивидуальное солнечное событие ионосфер двух планет земной группы, Венеры и Земли, которые различаются расстоянием от Солнца, составом атмосферы, скоростью вращения и прежде всего отсутствием или наличием внутреннего магнитного поля. Обе ионосферы реагируют на солнечную вспышку, но между ними наблюдаются существенные различия. Земная ионосфера, доминированная сильным внутренним магнитным полем, в большой степени экранирована от внешних влияний, и в ее ночной части реакция проявляется прежде всего в зоне конвекции, где силовые линии земного магнитного поля взаимодействуют с магнитным полем солнечного ветра, т. е. реакция полярной ионосферы намного

сильнее. На Венере, у которой нет собственного магнитного поля, явления в ночной ионосфере определяются переносом плазмы с дневной стороны через терминатор и потоками ионов, покидающих ионосферу, ускоренных в локальных индуцированных магнитных полях. Через отсутствие внутреннего магнитного поля восстановление ионосферы до равновесного состояния на Венере наступает намного медленнее, чем на Земле.

Авторы благодарят д-ра Лари Брейса из Университета в Мичигане (США) и Planetary Data System Университета Калифорнии (Лос Анджелес) за данные прибора ОЕТР.

1. Митра А., Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли. — М.: Мир, 1977.—370 с.
2. Brace L. H., Cliore A. J. The structure of Venus ionosphere // Space Sci. Rev.—1991.—55.—P. 81—163.
3. Brace L. H., Colin L., Pioneer Venus: Evolving coverage of the near-Venus environment // EOS Transactions, AGU.—1984.—65, N 25.—P. 401—402.
4. Brace L. H., Kasparzak W. T., Taylor H. A., et al. The ionotail of Venus: Its configuration and evidence for ion escape // J. Geophys. Res.—1987.—92, N A1.—P. 15—26.
5. Brace L. H., Theis R. F., Hoegy W. R., et al. The dynamic behavior of the Venus ionosphere // J. Geophys. Res.—1980.—85, N 13A.—P. 7663—7678.
6. Brace L. H., Theis R. F., Mihalov J. D. Response of nightside ionosphere and ionotail of Venus to variations in solar EUV and solar wind dynamic pressure // J. Geophys. Res.—1990.—95, N A4.—P. 4075—4084.
7. Heelis R. A., Hanson W. B., Lippincott C. R., et al. The ion drift-meter for Dynamics Explorer—B // Space Sci. Instrum.—1981.—5.—P. 511—526.
8. Hoegy W. R., Mahajan K. K., Solar EUV index for aeronautical studies at Earth from Langmuir probe photoelectron measure-

ments on the Pioneer Venus Orbiter // J. Geophys. Res.—1991.—97, N A7.—P. 10525—10537.

9. Krehbiel J. P., Brace L. H., Cutler J. R., et al. Pioneer Venus Orbiter Electron Temperature Probe // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.—1980.—GE—18.—P. 49—62.
10. Krehbiel J. P., Brace L. H., Theis R. F., et al. The Dynamics Explorer Langmuir probe instrument // Space Sci. Instrum.—1981.—5.—P. 493—508.
11. Theis R. F., Brace L. H., Elphic R. C., Mayr H. G. New empirical models of the electron temperature and density of the Venus ionosphere with applications to transterminator flow // J. Geophys. Res.—1984.—89, N A3.—P. 1477—1488.

---

#### EFFECT OF SOLAR FLARES ON THE IONOSPHERES OF VENUS AND THE EARTH FROM THE PIONEER VENUS AND DYNAMICS EXPLORER-B DATA

B. Kirov, K. Georgieva, D. Danov, L. Bankov, and A. Vassileva

The methods of comparative planetology are widely used for understanding the phenomena in Earth's ionosphere. In this paper we examine the reaction of the ionospheres of the Earth and Venus to an individual solar event — an X-ray / proton flare on 30 and 31 January 1982. The data from the Pioneer Venus and Dynamics Explorer-B satellites were used. This solar proton event was chosen because the position of the Earth and Venus at that time was such that it affected both planets. It is shown that both ionospheres reacted to the flare, but the reaction was much stronger in the nightside terrestrial ionosphere, and it was mainly seen in the convection zone, where the field lines of the Earth's magnetic field interact with the magnetic field of the solar wind. On Venus, which has no internal magnetic field, the phenomena observed in the nightside ionosphere are determined by the plasma transport from the dayside across the terminator and by the ion flows which leave the ionosphere, being accelerated in local induced magnetic fields. The initial conditions on Venus recover more slowly than on the Earth.