

PACS numbers: 94.20.-y, 94.50.Ci, 96.30.-t
DOI: 10.3367/UFNr.0180.201005j.0542

Результаты исследований солнечного ветра и ионосфер планет радиофизическими методами

Н.А. Арманд, Ю.В. Гуляев, А.Л. Гаврик,
А.И. Ефимов, С.С. Матюгов, А.Г. Павельев,
Н.А. Савич, Л.Н. Самознаев, В.М. Смирнов,
О.И. Яковлев

1. Введение

Представлены результаты исследований космической плазмы с использованием развитых в Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (ИРЭ) дистанционных методов. Основным итогом изучения околосолнечной плазмы является определение радиальных зависимостей скорости движения потоков плазмы и режимов турбулентности солнечного ветра на разных расстояниях от Солнца. Методом радиопросвечивания получены приоритетные данные о высотных профилях ночных ионосфер Марса и Венеры. Предложены и реализованы два метода мониторинга ионосферы Земли. В первом методе проводится радиопросвечивание ионосферы на *трассе космический аппарат – наземный пункт*. При реализации второго метода используются два спутника Земли, один из которых является источником зондирующих ионосферу радиоволн, а другой — приёмником модифицированных плазмой сигналов.

Цель сообщения состоит в кратком изложении основных результатов исследований различных типов космической плазмы, проведённых в отделе космической радиофизики ИРЭ в период с 1970 г. по 2009 г. Выполненные работы были посвящены изучению солнечного ветра, ионосфер Марса, Венеры и развитию новых методов мониторинга ионосферы Земли с использованием сигналов космических аппаратов. На рисунке 1 штриховыми линиями показаны трассы распространения радиоволн от космических аппаратов до наземных пунктов. Для изучения солнечного ветра мы использовали сигналы отечественных ("Марс-2", "Венера-10 (-15, -16)", европейских ("Helios", "Ulysses") и американских ("Galileo", MGS (Mars Global Surveyor)) космических аппаратов. Исследование плазменных оболочек Марса и Венеры удалось осуществить после вывода на орбиты первых искусственных спутников этих планет советских космических аппаратов "Марс-2", "Венера-9 (-10)". Мониторинг ионосферы Земли новым методом радиопросвечивания был реализован на трассах *спутник – спутник*. Для этого нами были использованы радиолинии между станцией "Мир" и геостационаром, а также между навигационными спутниками GPS (Global Positioning System) и исследовательскими спутниками

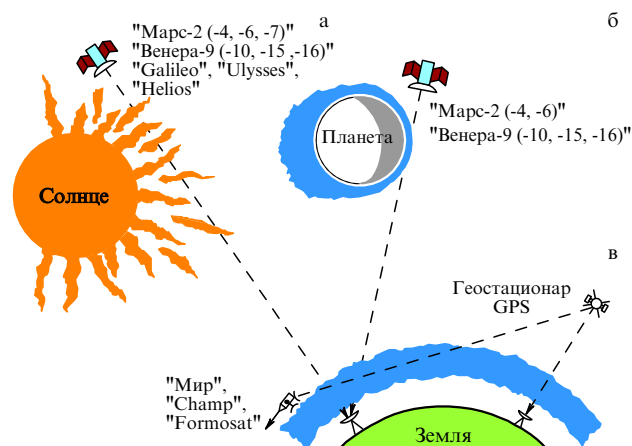


Рис. 1. Схема радиопросвечивания околосолнечной плазмы (а), ионосфер планет (б) и ионосферы Земли (в).

CHAMP (Challenging Minisatellite Payload) и "Formosat". При этом на первом этапе изучалось воздействие различных сред на амплитуду, фазу, частоту и спектр дециметровых радиоволн. Результаты первого этапа работ отражены в книге [1]. На втором этапе решались обратные задачи, по радиоданным определялись параметры плазмы на разном расстоянии от Солнца или поверхности планеты. Это сообщение содержит основные результаты второго этапа исследований.

2. Изучение солнечного ветра

К началу наших исследований было известно, что потоки плазмы солнечного ветра сильно неоднородны и скорость их движения вблизи Земли составляет $300 - 400 \text{ км с}^{-1}$. Область формирования и разгона солнечного ветра, расположенная на гелиоцентрических расстояниях между 2 и 40 солнечными радиусами R_0 , была изучена очень слабо. В частности, была осознана основная трудность теории: начальной энергии плазмы у Солнца недостаточно для её ускорения до сверхзвуковых скоростей.

В первую очередь необходимо было получить экспериментальные зависимости скорости солнечного ветра V от гелиоцентрического расстояния R , определить положение области перехода от дозвукового к сверхзвуковому течению потоков плазмы и найти область резкого ускорения солнечного ветра. Нами было осуществлено несколько крупномасштабных циклов радиозондирования околосолнечной и межпланетной плазмы с использованием разнесённых на большое расстояние Центров дальней космической связи. Движущиеся неоднородности плазмы приводят к коррелированным флуктуациям частоты радиоволн на разнесённых трассах, что позволяет измерить время запаздывания подобных флуктуаций в одном пункте по сравнению со временем в другом и таким способом определить скорость солнечного ветра. На рисунке 2 показаны зависимости скорости солнечного ветра V от гелиоцентрического расстояния R , выраженного в единицах солнечного радиуса R_0 , полученные в 1976 и 1984 гг. с помощью аппаратов "Венера-10 (-15, -16)". Эти первые экспериментальные зависимости $V(R)$ показали, что основное ускорение плазмы осуществляется на

© Н.А. Арманд, Ю.В. Гуляев, А.Л. Гаврик, А.И. Ефимов,
С.С. Матюгов, А.Г. Павельев, Н.А. Савич, Л.Н. Самознаев,
В.М. Смирнов, О.И. Яковлев 2010

Н.А. Арманд, Ю.В. Гуляев, А.Л. Гаврик, А.И. Ефимов,
С.С. Матюгов, А.Г. Павельев, Н.А. Савич, Л.Н. Самознаев,
В.М. Смирнов, О.И. Яковлев. Институт радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, г. Фрязино,
Московская обл., РФ
E-mail: efimov@ms.ire.rssi.ru

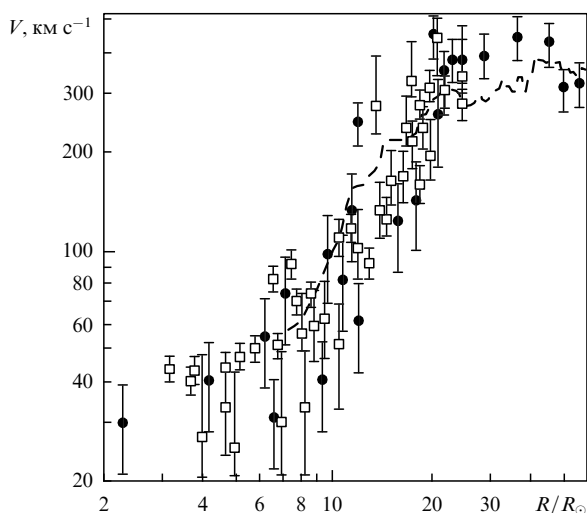


Рис. 2. Зависимость скорости солнечного ветра от гелиоцентрического расстояния по данным радиозондирования. Тёмные кружки — "Венера-10", 1976 г.; светлые квадраты — "Венера-15(-16)", 1984 г.; штриховая кривая — "Galileo", 1997 г.

расстояниях $(8-20)R_0$. В области $(7-12)R_0$ происходит переход от дозвукового к сверхзвуковому состоянию, а при $R > 40R_0$ скорость стабилизируется на уровне $300-400 \text{ км с}^{-1}$.

В 1996–1997 гг. на основе данных радиозондирования с использованием аппарата "Galileo" совместно с европейскими специалистами была также получена зависимость $V(R)$, показанная на рис. 2 штриховой кривой. Этот результат полностью подтвердил справедливость ранее сделанных выводов о скоростном режиме солнечного ветра в области его основного ускорения.

Было высказано предположение, что эффект резкого ускорения солнечного ветра может быть обусловлен приходом из короны интенсивных альвеновских волн, которые путём диссипации передают дополнительную энергию солнечному ветру. Для подтверждения этой гипотезы нужно было обнаружить в короне и сверхкороне Солнца альвеновские волны. На основе анализа вариаций угла поворота плоскости поляризации (фардеевского вращения) зондирующих плазму линейно поляризованных радиоволн с использованием методики корреляционного анализа флуктуаций фардеевского вращения, наблюдавшихся в разнесённых на большое расстояние наземных пунктах, было установлено, что на расстояниях $(4-10)R_0$ действительно присутствуют интенсивные альвеновские волны, движущиеся со скоростью $400-1000 \text{ км с}^{-1}$.

Солнечный ветер можно представить статистически неоднородной средой, подобной турбулентному газу. При таком подходе в теорию вводят три характеристики: показатель степенного пространственного спектра неоднородностей p , минимальный масштаб l и максимальный внешний масштаб L_0 . На малых расстояниях от Солнца ($R < 60 R_0$) эти характеристики удаётся определить только методом радиозондирования, анализируя флуктуации фазы, частоты и амплитуды радиоволн. На рисунке 3 представлены экспериментальные зависимости показателя пространственного спектра неоднородностей p от гелиоцентрического расстояния. Из представленных данных следует, что при $R > 25 R_0$

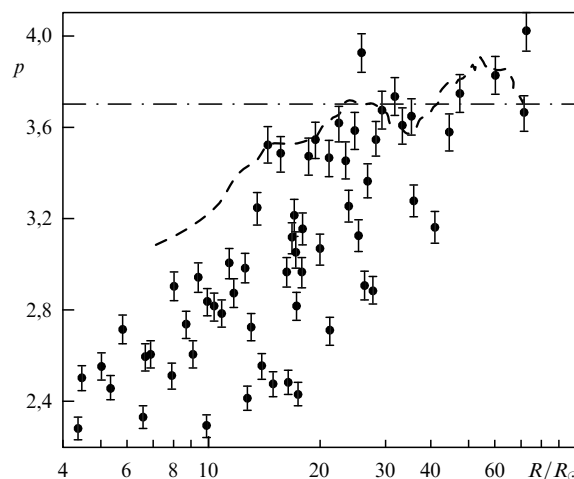


Рис. 3. Спектральный индекс пространственного спектра турбулентности окосолнечной плазмы по данным её радиозондирования сигналами аппаратов "Венера-15(-16)" в 1984 г. (тёмные кружки) и сигналами аппарата "Galileo" в 1997 г. (штриховая кривая).

среда действительно подобна турбулентному газу, $p \approx 3,7$, что соответствует спектру Колмогорова, а при $R < 18 R_0$ показатель p монотонно уменьшается и для дистанций $(4-6)R_0$ значение $p \approx 3$, что характерно для плазменных волн. Тёмными кружками даны значения спектрального индекса p , полученные при зондировании солнечного ветра сигналами отечественных спутников "Венера-15(-16)" (1984 г.). Низкие значения спектрального индекса в области малых расстояний $R < 10 R_0$ характеризуют мелкомасштабные неоднородности. Штриховая кривая на рис. 3 характеризует данные, полученные при проведении в 1997 г. экспериментов радиопросвечивания солнечного ветра сигналами европейского спутника Юпитера "Galileo", материалы которых были обработаны в ИРЭ и опубликованы совместно с авторами экспериментов.

Пространственный спектр неоднородностей описывается также двумя характерными линейными размерами. Максимальный масштаб L_0 связан с особенностями выброса плазмы из разных областей ближней короны Солнца, он пропорционален расстоянию R . Вблизи короны максимальный масштаб имеет порядок радиуса Солнца. Минимальный масштаб определяет характерные размеры неоднородностей среды, на которых происходит быстрый переход энергии турбулентности или волновых явлений в тепло, т.е. осуществляется нагрев плазмы. По-видимому, минимальный масштаб l примерно соответствует гирорадиусу протонов, его величина также возрастает при удалении от Солнца.

Таким образом, оба характерных масштаба во внутренних областях солнечного ветра увеличиваются с возрастанием гелиоцентрического расстояния примерно по линейному закону. Ширина инерционного интервала спектра неоднородностей плазмы, составляющая около четырёх порядков, остаётся примерно одной и той же на различных расстояниях от Солнца. Однако процессы, ответственные за эволюцию показателя p внешнего и внутреннего масштабов, различны.

Основные результаты изучения солнечного ветра были получены для экваториальной области солнечного

ветра [2–12]. В последнее время методом радиозондирования получены достоверные данные о солнечном ветре, эмитируемом высокоширотными областями солнечной короны, где скорость движения потоков плазмы очень велика.

3. Результаты исследований ионосфер Марса и Венеры

Исследование ионосфер методом радиопросвечивания возможно в тех случаях, когда излучающий радиосигналы космический аппарат заходит за диск планеты или выходит из-за него, а наземный приёмный пункт ведёт регистрацию трансформированных атмосферой планеты сигналов. Метод радиопросвечивания использует связь изменений частоты и амплитуды радиоволн, обусловленных средой, с углом рефракции, который, в свою очередь, связан с высотным профилем показателя преломления ионосферы и, следовательно, с электронной концентрацией. Для осуществления двухчастотного радиопросвечивания на космических аппаратах "Марс-2 (-4)" и "Венера-9 (-10, -15, -16)" устанавливались передатчики сантиметрового и дециметрового диапазонов ($\lambda_1 = 8$ см и $\lambda_2 = 32$ см), а на наземном пункте регистрировались приведённая разность частот и вариации амплитуды когерентных между собой сигналов.

Впервые эксперимент двухчастотного радиопросвечивания был реализован применительно к исследованию ионосферы Марса в 1971 г., когда аппарат "Марс-2" заходил за диск планеты. Просвечивание проводилось на освещённой стороне планеты, зенитный угол Z_0 в точке касания составил 50° . В результате обработки данных получено высотное распределение электронной концентрации $N(h)$. Следующий эксперимент просвечивания был проведён в 1974 г. В этом случае сигналы аппарата "Марс-4" зондировали вечернюю ионосферу

Марса при $Z_0 = 82^\circ$. Концентрация в максимуме составила $5,9 \times 10^4 \text{ см}^{-3}$, его высота 140 км, высотная протяжённость ионосферы около 300 км. При выходе аппарата "Марс-4" из-за диска планеты было осуществлено радиопросвечивание неосвещённой стороны Марса, при котором впервые обнаружили ночную ионосферу этой планеты. Оказалось, что максимум ионизации, находящийся на высоте 110 км, имеет концентрацию $\approx 4,6 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$, а полутолщина основного слоя составила примерно 35 км. На рисунке 4а показаны профили электронной концентрации марсианской ионосферы, полученные методом радиопросвечивания при различных условиях освещённости Солнцем. На дневной стороне ионосфера имеет область главного и нижнего максимумов, концентрация в которых уменьшается с увеличением зенитного угла Солнца. Концентрация плазмы и высотная протяжённость ночной ионосферы намного меньше дневной.

Эксперименты многократного радиопросвечивания ионосферы Венеры были осуществлены в октябре–декабре 1975 г. при использовании отечественных спутников "Венера-9 (-10)". Обработка данных позволила определить 13 распределений электронной концентрации в дневной ионосфере и 22 распределения в ночной. Полученные результаты носят приоритетный характер, поскольку до экспериментов со спутниками "Венера-9 (-10)" сведения об ионосфере Венеры были весьма ограничены.

В 1983–1984 гг. с помощью спутников "Венера-15 (-16)" проведена ещё одна большая серия радиозатменных экспериментов: в общей сложности получено 155 высотных профилей электронной концентрации $N(h)$ (73 профиля для дневной ионосферы, 62 профиля для ночной и 20 для области терминатора). Успешное осуществление многократных экспериментов позволило выявить закономерности поведения ионосферы Венеры при различных условиях освещённости. На рисунке 4б показаны три распределения электронной концентрации, характери-

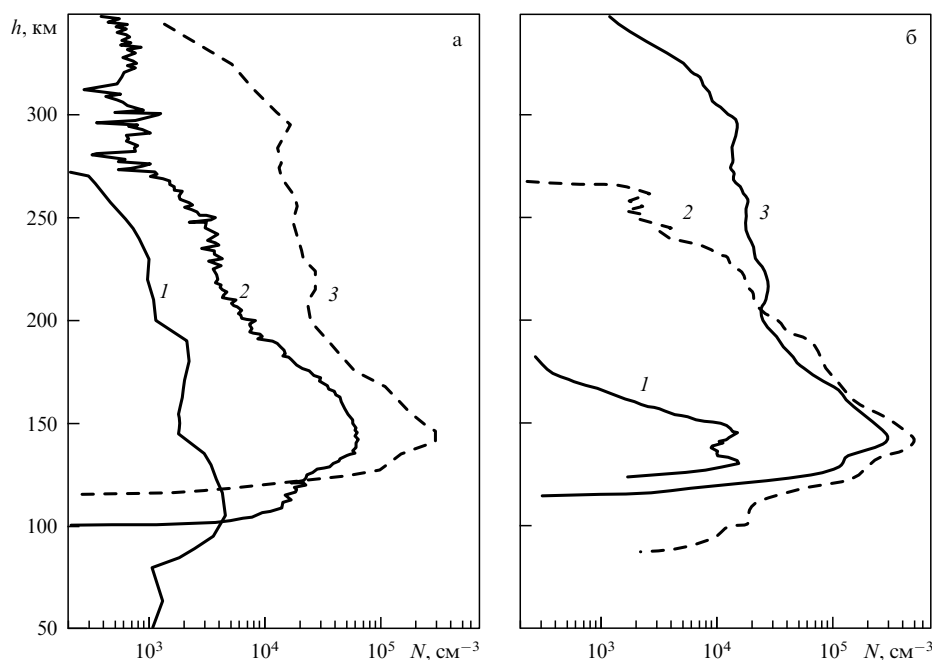


Рис. 4. Примеры высотных распределений электронной концентрации $N(h)$ в ионосферах Марса и Венеры: (а) распределение $N(h)$ для ночной (1), вечерней (2) и дневной (3) ионосферы Марса, (б) распределение $N(h)$ для ночной (1) ионосферы Венеры; ионосферы при малых зенитных углах ($Z_0 = 10^\circ$, кривая 2) и больших зенитных углах ($Z_0 = 72^\circ$, кривая 3).

зующие основные свойства дневной ионосферы Венеры. Установлено, что концентрация в главном максимуме ионизации закономерно уменьшается с возрастанием зенитного угла Солнца Z_0 от $5 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$ при $Z_0 \approx 0$ до $2 \times 10^4 \text{ см}^{-3}$ при $Z_0 \approx 80^\circ - 90^\circ$. Высота главного максимума практически не зависит от Z_0 и составляет около 140 км. На высотах 130–135 км обнаружено регулярное существование нижнего максимума ионизации. Обнаружено регулярное существование нижней ионосферы на высотах $h < 120$ км, где имеются дополнительные максимумы электронной концентрации. Распределение $N(h)$ в верхней ионосфере на высотах $h > 200$ км изменчиво, высота верхней границы ионосферы имеет тенденцию к возрастанию с увеличением Z_0 . При малых Z_0 (кривая 2) она составляет около 270 км, с увеличением Z_0 высота верхней границы возрастает (кривая 3).

На рисунке 4б показаны также распределения электронной концентрации в ночной ионосфере Венеры, характеризующие её основные свойства (кривая 1). Ночная ионосфера состоит из одного или двух тонких ионизованных слоёв, полутолщины этих слоёв составляют 5–10 км. Особенностью ночной ионосферы является её сильная изменчивость: концентрация в максимуме ионизации изменяется от $3 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$ до $2 \times 10^4 \text{ см}^{-3}$. Изменяются также вид профиля $N(h)$, высотная протяжённость, полутолщины слоёв, высоты их максимумов. Средняя высота главного максимума ионизации составляет ≈ 140 км, а значения высоты верхней границы ночной ионосферы изменяются в пределах 140–250 км.

Полученные методом радиопросвечивания высотные профили электронной концентрации ионосфер Марса и Венеры, а также данные локальных измерений газового состава атмосферы, её температуры, ионного состава в окрестностях планет послужили основой для создания теории формирования ионосфер планет земной группы. Поскольку газовый состав атмосфер Марса и Венеры примерно одинаков, процессы, формирующие ионосферы этих планет, являются приблизительно одинаковыми. Область главного и нижнего максимумов дневной ионосферы Марса и Венеры формируется фотохимическими процессами, и преобладающим там является ион молекулярного кислорода. В верхней ионосфере доминирующую роль играют вертикальная диффузия иона атомарного кислорода и давление солнечного ветра. Ночную ионосферу Венеры поддерживают, вероятно, два источника ионизации. Один из них — потоки надтепловых электронов, а другой источник ночной ионизации — перенос иона атомарного кислорода с дневной стороны планеты на ночную с последующей их диффузией вниз. Основные результаты изучения ионосфер Марса и Венеры изложены в работах [13–18].

Высокая точность двухчастотного метода позволила по данным радиозатменных экспериментов со спутником "Луна-19" обнаружить околосолнечную плазму с концентрацией $400 - 800 \text{ см}^{-3}$ [19], а со спутниками "Вега-1 (-2)" обнаружить плазменную оболочку кометы Галлея с концентрацией $10^3 - 3,6 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$ [20, 21].

4. Развитие методов мониторинга ионосферы Земли

Нам удалось развить два новых метода мониторинга ионосферы Земли. В первом методе используются линии радиосвязи между спутниками GPS и наземными пунк-

тами, а во втором радиопросвечивание осуществляется на трассе *спутник–спутник*. Навигационные системы GPS и ГЛОНАСС (Глобальная навигационная спутниковая система) обеспечивают уникальную возможность получения сведений о высотном распределении электронной концентрации ионосферы Земли методом радиопросвечивания с использованием трасс *навигационный спутник–наземный пункт* (первый метод) для различных гелио- и геофизических условий в любое время суток в разных регионах Земли. Измеряемые параметры радиосигналов (фаза или время задержки) содержат информацию об интегральных характеристиках среды, через которую прошли радиоволны. Определение разности псевдодальностей, измеренных на двух частотах, эквивалентно определению интегральной электронной концентрации ионосферы. Вариации измеряемых расстояний и времени распространения (фазы или временной задержки) радиосигналов обусловлены вариациями коэффициента преломления радиоволн в пространстве и времени. Этот метод основан на зависимости характеристик принимаемых радиоволн от распределения электронной концентрации ионосферы. Математически эта зависимость описывается интегральным уравнением Фредгольма первого рода, которое не имеет аналитического решения и требует разработки методов обращения в классе некорректных задач. Наличие действующей компьютерной техники позволяет использовать эти методы для обращения результатов измерений параметров радиосигналов и оперативного определения высотного профиля электронной концентрации. Алгоритм решения таких обратных задач, неустойчивых по своей природе, требует применения специальных математических методов, позволяющих учитывать дополнительную информацию о решаемой задаче. Такую информацию дают модели распределения электронной концентрации, например IRI (International Reference Ionosphere). На основе этой модели нами был развит эффективный метод решения обратной задачи радиопросвечивания ионосферы на трассе *спутник–Земля*, основанный на использовании связи параметров зондирующих сигналов с высотным профилем электронной концентрации. На его основе разработана технология непрерывного мониторинга, предназначенная для реконструкции пространственно-временной структуры ионосферы. Разработанный метод позволяет восстанавливать высотное распределение электронной концентрации ионосферы в диапазоне высот от 100 до 1000 км с погрешностью, $\pm 0,02 \text{ NU}$ ($1 \text{ NU} = 10^6$ электронов на 1 см^3). Значение электронной концентрации на высоте максимума ионосферы определяется с точностью $\pm 0,014 \text{ NU}$. Использование модельных представлений об ионосфере в развитии нами метода приводит к существенному снижению времени определения профиля электронной концентрации.

На рисунке 5а и 5б приведены примеры получаемых профилей $N(h)$ и, для сравнения, данные ионозонда вертикального зондирования, а также и результаты расчёта на основе модели IRI. Определяя этим методом электронную концентрацию в ионосфере над определённой территорией, можно выявить наличие особенностей в пространственном распределении ионосферной плазмы, так как в течение суток с одного наземного пункта можно получить более 10000 высотных профилей электронной плотности для участка радиусом до 1000 км. Примеры

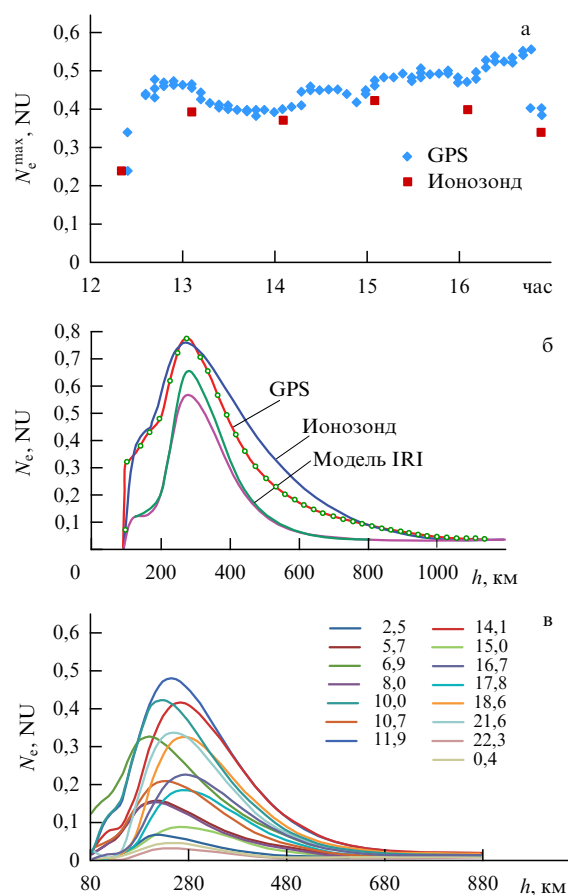


Рис. 5. Сравнение результатов определения электронной концентрации по наблюдениям спутников GPS с данными ионозонда.

профилей для одного пункта приведены на рис. 5в. Метод радиопросвечивания позволяет определять распределение электронной концентрации в ионосфере в реальном режиме времени в любом месте земного шара по наблюдениям с одного наземного пункта, что важно для удалённых и труднодоступных регионов [22–24]. Этот метод может служить одним из элементов глобальной системы мониторинга ионосферы Земли.

Для глобального мониторинга ионосферы оказался эффективен и второй метод: затенённое радиопросвечивание с использованием трасс *спутник–спутник*. В первых радиозатенных экспериментах ионосферы, осуществлённых на трассах *орбитальная станция "Мир"–геостационарные спутники*, было показано, что этот метод даёт детальную информацию о высотном профиле электронной концентрации в нижней ионосфере на высотах 80–150 км. Сигналы спутников навигационной системы GPS, принятые низкоорбитальными аппаратами CHAMP и "Formosat", применялись для массового радиопросвечивания нижней ионосферы во всех районах Земли при различной освещённости и при разной солнечной активности. Данные зондирования ионосферы на трассах спутник–спутник обрабатывались совместно со специалистами Геофизического центра Германии и Центра дистанционного зондирования и космических исследований Тайваня. Особенно ярко в радиоданных проявляются спорадические ионосферные образования на высотах 85–120 км. Вариации фазы и амплитуды радиоволн чётко отслеживают особенности высотного

распределения электронной концентрации E_s -структур, так что возможно определять верхнюю и нижнюю границы этих структур с ошибкой не более чем ± 1 км. Были получены подробные статистические данные о вероятности появления E_s -структур в экваториальной области, средних широтах и полярных районах в условиях дня и ночи. Этим методом были изучены флуктуации амплитуды и фазы радиоволн, обусловленные мелкомасштабной неоднородностью плазмы в F-области. Интенсивность и спектр неоднородностей изменяются в период воздействия ударных волн солнечного ветра. Между двумя событиями — приходом к Земле ударной волны солнечного ветра и появлением спорадических образований в нижней ночной полярной ионосфере с увеличенной электронной концентрацией и возрастанием интенсивности мелкомасштабной неоднородности плазмы в F-области — существует устойчивая связь. Метод радиопросвечивания на трассах *спутник–спутник* позволил выявить связь следующих явлений: приход ударной волны солнечного ветра $\Rightarrow$ высыпание из радиационного пояса протонов и электронов $\Rightarrow$ возбуждение мелкомасштабной неоднородности плазмы в F-области ионосферы $\Rightarrow$ появление интенсивных E_s -структур в полярной ионосфере. Известно, что возникновение E_s -структур может быть обусловлено разными факторами. Радиозатенный метод радиопросвечивания подтвердил известный факт независимости вероятности появления E_s -образований в экваториальных районах от солнечной активности. По нашим данным в этих районах и днём, и ночью часто наблюдаются тонкие E_s -структуры, параметры которых не изменялись даже после прихода рекордно больших по интенсивности ударных волн солнечного ветра.

В настоящее время усилиями американских, тайваньских и немецких специалистов формируется международная система радиозатенного мониторинга атмосферы и ионосферы, которая обеспечивает более 2500 радиопросвечиваний атмосферы и ионосферы Земли каждые сутки. В нашем институте создан и непрерывно пополняется банк радиозатенных данных. Это требует разработки методов автоматизированной обработки первичных материалов. При анализе E_s -структур был сформулирован признак появления интенсивных спорадических структур, что позволило получать карты географического распределения таких образований.

На рисунке 6а показана полученная по данным спутников "Formosat-3" карта распределения интенсивных спорадических слоёв E_s во время минимума солнечной активности для наблюдений 1, 11 и 12 июня 2006 г. На карте заметна концентрация интенсивных спорадических слоёв в средних широтах северного полушария Земли, где в июне высота Солнца над горизонтом максимальна, соответственно максимальным является уровень ионизации ионосферы ультрафиолетовым излучением. Ночные спорадические слои распределены по земному шару более равномерно, что указывает на иной механизм их возникновения. Анализ материалов крупномасштабной базы данных объёмом около 500 тысяч сеансов радиопросвечивания, созданной с помощью спутника CHAMP в течение 2001–2008 гг., позволил получить информацию о долговременных изменениях усреднённого индекса S_4 , характеризующего уровень амплитудных флуктуаций зондирующих сигналов. Величины индекса S_4 для каждого радиозатенного сеанса определялись в виде сред-

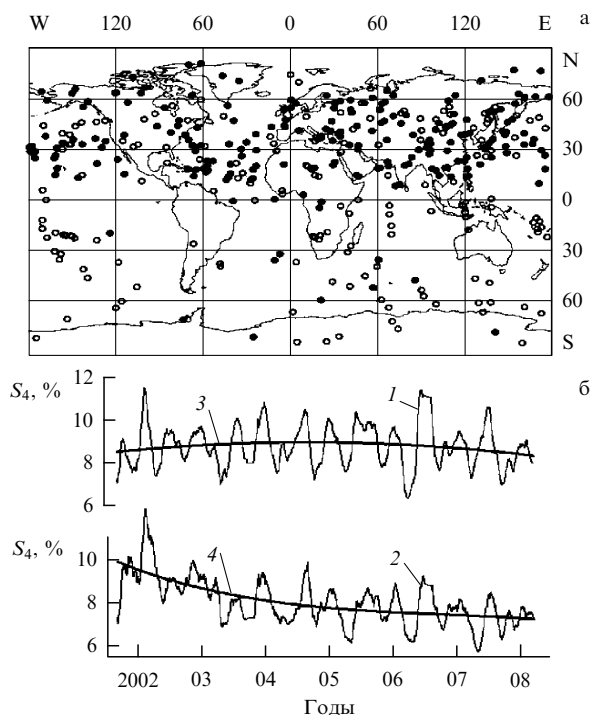


Рис. 6. (а) Глобальное распределение интенсивных спорадических слоёв E_s по данным спутников "Formosat-3" с индексом $S_4 > 0,12$, в период 1, 11 и 12 июня 2006 г. Тёмные кружки соответствуют дневным событиям, светлые — ночным. (б) Зависимость усреднённого индекса S_4 от времени в период с 2001 г. по 2008 г. по данным спутника CHAMP.

них значений для относительных вариаций интенсивности сигналов, когда высота h перигея луча превышала 40 км, где влияние ионосферы преобладает над влиянием атмосферы. В среднем за сутки получалось около 200 значений индекса S_4 для разных районов земного шара. Полученные в сеансах измерений данные усреднялись по временному интервалу 27 сут и группировались по широтным зонам Земли. На рисунке 6б представлены результаты анализа вариаций индекса S_4 в зоне с широтой, меньшей 55° (кривые 1, 3), и в полярных районах (широта более 55° , кривые 2, 4). Гладкие кривые 3, 4 соответствуют аппроксимации экспериментальных данных методом наименьших квадратов. Вариации индекса S_4 коррелируют между собой в различных географических зонах, что указывает на общий механизм их происхождения, связанный с воздействием ультрафиолетового излучения Солнца на ионизацию ионосферы. Медленный тренд индекса S_4 зависит от географического положения района измерений. В полярных районах индекс S_4 в течение 2001–2008 гг. постепенно снижался от 10 % до 7 %, тогда как в остальных районах его значение оставалось практически неизменным ($\approx 8,8$ %). Различие в медленных изменениях индекса S_4 в указанных районах связано, по-видимому, с разными механизмами ионизации. В полярных районах возможен спад ионизации, связанный с уменьшением интенсивности воздействия солнечного ветра на ионосферу на нисходящей ветви солнечной активности. В остальных районах преобладал механизм ионизации, вызванный ультрафиолетовым излучением Солнца. Из анализа долговременных изменений индекса мерцаний зондирующих ионосферу радиоволн следует, что к

изменению солнечной активности более чувствительны мерцания радиосигналов в высокоширотной ионосфере. Проведённый анализ показал также важность изучения характеристик амплитудных вариаций сигналов спутников системы GPS для исследования механизма взаимосвязи между солнечной активностью и процессами в ионосфере и мезосфере.

Создание, реализация и развитие метода радиозатменного мониторинга ионосферы Земли отражено в работах авторов [25–33].

5. Заключение

Нами одновременно с зарубежными специалистами предложен, реализован, развит и совершенствуется метод радиопросвечивания для изучения плазменных сред космического происхождения: околосолнечной и межпланетной плазмы, ионосфер Марса, Венеры, Земли, плазменных оболочек Луны и комет. Трудный путь этих исследований частично отражён в публикациях [1–33]. Эта задача не могла быть решена в полном объёме до тех пор, пока не появились соответствующие средства космического и наземного базирования: долгоживущие космические аппараты, оснащённые мощными высокостабильными источниками радиозондирования космических сред, высокочувствительными системами приёма и регистрации зондирующих сигналов и высокоскоростными комплексами обработки информации. Возможности совершенствования по каждому из этих направлений ещё не исчерпаны, а следовательно, можно ожидать достижения новых интересных результатов в области изучения Солнечной системы радиофизическими методами.

Успехи в развитии космической радиофизики в Институте радиотехники и электроники (ныне им. В.А. Котельникова) связаны с активной поддержкой их академиком В.А. Котельниковым и профессором М.А. Колосовым и многими специалистами промышленных организаций, обеспечивших запуск, выведение на соответствующие орбиты космических аппаратов, а также регистрацию излучаемых ими сигналов в Центрах дальней космической связи.

Список литературы

1. Яковлев О И *Космическая радиофизика* (М.: РФФИ, 1998)
2. Яковлев О И и др. *Астрон. журн.* **57** 790 (1980) [Yakovlev O I et al. *Sov. Astron.* **24** 454 (1980)]
3. Ефимов А И и др. *Радиотех. и электрон.* **26** 311 (1981)
4. Kolosov M A et al. *Radio Sci.* **17** 664 (1982)
5. Рубцов С Н, Яковлев О И, Ефимов А И *Космич. исслед.* **25** 620 (1987)
6. Яковлев О И, Ефимов А И, Рубцов С Н *Астрон. журн.* **65** 1290 (1988) [Yakovlev O I, Efimov A I, Rubtsov S N *Sov. Astron.* **32** 672 (1988)]
7. Яковлев О И, Шишов В И, Чашей И В *Письма в Астрон. журн.* **16** 163 (1990) [Yakovlev O I, Shishkov V I, Chashei I V *Sov. Astron. Lett.* **16** 70 (1990)]
8. Ефимов А И и др. *Астрон. журн.* **70** 1075 (1993) [Efimov A I et al. *Astron. Rep.* **37** 542 (1993)]
9. Efimov A I et al. *Adv. Space Res.* **14** 93 (1994)
10. Ефимов А И и др. *Письма в Астрон. журн.* **26** 630 (2000) [Efimov A I et al. *Astron. Lett.* **26** 544 (2000)]
11. Ефимов А И и др. *Радиотех. и электрон.* **54** 773 (2009) [Efimov A I et al. *J. Commun. Technol. Electron.* **54** 733 (2009)]
12. Ефимов А И и др. *Астрон. журн.* **79** 640 (2002) [Efimov A I et al. *Astron. Rep.* **46** 579 (2002)]
13. Колосов М А и др. *Радиотех. и электрон.* **18** 2009 (1973)
14. Александров Ю Н и др. *Космич. исслед.* **14** 824 (1976)

15. Васильев М Б и др. *ДАН СССР* **218** 1298 (1974) [Vasil'ev M B et al. *Sov. Phys. Dokl.* **19** 629 (1975)]
16. Савич Н А и др. *Радиотех. и электрон.* **31** 433 (1986)
17. Савич Н А и др. *Радиотех. и электрон.* **31** 2113 (1986)
18. Гаврик А Л, Гаврик Ю А, Самознаев Л Н *РЭ* **53** 1104 (2008) [Gavrik A L, Gavrik Yu A, Samaznaev L N *J. Commun. Technol. Electron.* **53** 1044 (2008)]
19. Васильев М Б и др. *ДАН СССР* **212** 67 (1973) [Vasil'ev M B et al. *Sov. Phys. Dokl.* **18** 566 (1974)]
20. Савич Н А и др. *Письма в Астрон. журн.* **12** 675 (1986) [Savich N A et al. *Sov. Astron. Lett.* **12** 283 (1986)]
21. Андреев В Е, Гаврик А Л *Письма в Астрон. журн.* **19** 12 1081 (1993) [Andreev V E, Gavrilik A L *Pis'ma Astron. Zh.*
22. Андрианов В А, Смирнов В М *Радиотех. и электрон.* **38** 1326 (1993)
23. Смирнов В М *Радиотех. и электрон.* **46** 47 (2001) [Smirnov V M *J. Commun. Technol. Electron.* **46** 41 (2001)]
24. Смирнов В М и др. *Радиотех. и электрон.* **53** 1112 (2008) [Smirnov V M et al. *J. Commun. Technol. Electron.* **53** 1052 (2008)]
25. Кучерявенков А И, Яковлев О И, Кучерявенкова И Л, Самознаев Л Н *Радиотех. и электрон.* **43** 945 (1998) [Kucheryavenkov A I, Yakovlev O I, Kucheryavenkova I L, Samaznaev L N *J. Commun. Technol. Electron.* **43** 880 (1998)]
26. Pavelyev A et al. *Radio Sci.* **37** 1043 (2002)
27. Pavelyev A G et al. *J. Geophys. Res.* **112** A06326 (2007)
28. Павельев А Г, Викерт Й, Лиу Й *Изв. вузов. Радиофизика* **51** 1 (2008) [Pavelyev A G, Wickert J, Lion Y *Radiophys. Quantum Electron.* **51** 1 (2008)]
29. Pavelyev A G et al. *Geophys. Res. Lett.* **36** L21807 (2009)
30. Павельев А Г, Матюгов С С, Яковлев О И *Радиотех. и электрон.* **53** 1081 (2008) [Pavelyev A G, Matyugov S S, Yakovlev O I *J. Commun. Technol. Electron.* **53** 1021 (2008)]
31. Яковлев О И, Матюгов С С, Ануфриев В А *Изв. вузов. Радиофизика* **52** 181 (2009) [Yakovlev A G, Matyugov S S, Anufriev V A *Radiophys. Quantum Electron.* **52** 165 (2009)]
32. Яковлев О И, Викерт Й, Ануфриев В А *Докл. РАН* **427** 624 (2009) [Yakovlev O I, Wickert J, Anufriev V A *Dokl. Phys.* **54** 363 (2009)]
33. Yakovlev O I et al. *Acta Astronaut.* **63** 1350 (2008)

PACS numbers: 41.20.Jb, **94.20.** – y, **94.80.** + g
DOI: 10.3367/UFNr.0180.201005k.0548

Спутниковое радиозондирование и радиотомография ионосферы

В.Е. Куницын, Е.Д. Терещенко,
Е.С. Андреева, И.А. Нестеров

1. Введение

Для изучения ионосферы и физики протекающих в ней процессов необходимы исследования пространственного распределения ионосферной плазмы. Ионосфера как среда распространения радиоволн существенным образом влияет на работу различных систем навигации, локации и связи. Поэтому исследования структуры ионосферы представляют интерес для многих практических задач. Существующие радиолокационные средства и ионозонды позволяют проводить лишь локальную диагностику ионосферы. Создание достаточно плотной сети традиционных средств зондирования ионосферы весьма сложно и дорого. Низкоорбитальные (типа российской системы "Цикада" и американской

"Транзит") и высокоорбитальные (GPS/ГЛОНАСС) спутниковые навигационные системы и сеть наземных приёмников дают возможность проводить зондирование ионосферы по различным направлениям и применять томографические методы, т.е. позволяют восстанавливать пространственную структуру электронной концентрации ионосферы. Методы спутниковой радиотомографии (РТ) ионосферы успешно развиваются в настоящее время [1–7]. С начала 1990-х годов действуют системы РТ на базе низкоорбитальных (НО) навигационных систем. В последние годы активно проводятся РТ-исследования по данным высокоорбитальных (ВО) навигационных систем [6, 7]. Для обозначения различных видов РТ здесь используются термины "низкоорбитальная РТ" и "высокоорбитальная РТ" ионосферы (НОРТ и ВОРТ соответственно).

2. Низкоорбитальная радиотомография ионосферы

Низкоорбитальные навигационные системы, имеющие практически круговую орбиту на высоте около 1000–1150 км, и наземные цепочки приёмников дают возможность получать серии РТ-данных по различным лучам. В РТ-экспериментах приём двух когерентных спутниковых сигналов на частотах 150 и 400 МГц и регистрация разности фаз между ними (приведённой фазы) осуществляется на сети из нескольких наземных приёмных станций, расположенных вдоль траектории спутников на расстояниях нескольких сотен километров. Измерения приведённой фазы φ в приёмных точках являются данными для РТ-реконструкции. Интегралы от электронной концентрации N вдоль лучей между приёмником на Земле и передатчиком на спутнике пропорциональны абсолютной (полной) фазе Φ [1, 2], включающей в себя неизвестную начальную фазу φ_0 :

$$\alpha \lambda r_e \int N d\sigma = \Phi = \varphi_0 + \varphi, \quad (1)$$

где λ — длина зондирующей волны, $d\sigma$ — элемент длины луча, r_e — классический радиус электрона, коэффициент пропорциональности α (порядка единицы) определяется выбором зондирующих частот. Перепишем уравнение (1) в операторном виде [4], учитывая типичный некоррелированный экспериментальный шум ξ :

$$PN = \Phi + \xi, \quad (2)$$

здесь P — проекционный оператор, переводящий двумерное распределение N в набор одномерных проекций Φ . Таким образом, задача томографической реконструкции состоит в решении системы линейных интегральных уравнений (2) и нахождении электронной концентрации N . Одним из возможных вариантов является дискретизация (аппроксимация) проекционного оператора P . В этом случае получаем соответствующую систему линейных уравнений (СЛУ) с дискретным оператором L :

$$LN = \Phi + \xi + E, \quad E = LN - PN, \quad (3)$$

где E — ошибка аппроксимации, зависящая от самого решения N . Отметим, что уравнения (2) и (3) эквивалентны, если известна ошибка аппроксимации E .

© В.Е. Куницын, Е.Д. Терещенко, Е.С. Андреева, И.А. Нестеров 2010