

УДК 551.051+621.396

## АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ИОНОСФЕРНЫХ И АТМОСФЕРНЫХ СЛОЁВ ПО РАДИОЗАТМЕННЫМ ДАННЫМ

А. Г. Павельев<sup>1</sup>, К. Занг<sup>2</sup>, С. Ванг<sup>2</sup>, Й. Луу<sup>3</sup>, Ю. Кулешов<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, г. Фрязино, Московская обл., Россия

<sup>2</sup> SPACE Research Centre, RMIT University, Melbourne, Australia

<sup>3</sup> Center for Space and Remote Sensing Research, National Central University, Chung-Li, Taiwan

<sup>4</sup> National Climate Centre, Bureau of Meteorology, Melbourne, Australia

Обобщён фундаментальный принцип радиозатменного метода исследования атмосфер и ионосфер планет и Земли. Получен критерий, содержащий необходимое и достаточное условие, при выполнении которого тангенциальная точка, где градиент показателя преломления перпендикулярен лучевой траектории, совпадает с перигеем радиолуча. Предложен метод определения положения и параметров слоёв в атмосфере и ионосфере, основанный на связи между амплитудами и фазами аналитических функций, определённых по вариациям фазового пути (эйконала) и интенсивности радиозатменного сигнала. Данный метод даёт качественную и количественную оценку величины пространственного смещения ионосферного или атмосферного слоя относительно перигея радиолуча, а также позволяет определить высоту и наклон ионосферного слоя. Развита методика необходима, в частности, при определении положения и наклона области ветрового сдвига, а также направления распространения внутренних волн в ионосфере и атмосфере. Она проще и точнее радиологического метода обратного распространения, применявшегося ранее для определения положения неоднородностей в ионосфере.

### ВВЕДЕНИЕ

Радиозатменный метод широко используется при двухпозиционном дистанционном зондировании, когда передатчик и приёмник движутся с противоположных сторон относительно лимба планеты. С 1964 года данный метод успешно применяется для изучения слоистой структуры атмосфер и ионосфер планет [1, 2]. С появлением геостационарных и навигационных спутников начались радиозатменные эксперименты с целью изучения трёхмерной структуры ионосферы и атмосферы Земли в глобальном масштабе [3, 4]. Применение высокостабильных, синхронизированных атомными часами, сигналов навигационных систем для радиозатменных исследований атмосферы и ионосферы Земли существенно увеличило эффективность радиозатменного метода, преимуществами которого являются большое пространственное разрешение, глобальность зондирования, высокая точность, долговременная стабильность, всепогодность и возможность практически одновременных измерений структуры атмосферы и ионосферы [3–7]. Радиозатменный мониторинг сравним по эффективности с глобальной радиотомографией, применяемой для дистанционного зондирования ионосферы с помощью наземных и спутниковых средств [8].

Глобальная сферическая симметрия ионосферы и атмосферы и совпадение их центров являются основными условиями, лежащими в основе радиозатменного метода [1–7]. При его выполнении изменения вертикального градиента показателя преломления в перигее радиолуча являются основной причиной вариаций амплитуды и фазы радиозатменного сигнала, регистрируемого приёмным устройством низкоорбитального спутника [9]. Интенсивные, зависящие от частоты вариации амплитуды и фазы радиозатменного сигнала, которые часто наблюдаются в интервале высоты перигея радиолуча  $h(T)$  между 30 и 80 км, расположенном выше главной части

нейтральной атмосферы и ниже  $E$ -слоя ионосферы, противоречат предположению о глобальной сферической симметрии [10]. Это явление было объяснено в работах [11–13] влиянием наклонных плазменных слоёв, находящихся в ионосфере на обычных высотах 90–130 км, но существенно удалённых от перигея радиолуча. В работах [10, 14] был предложен радиолографический метод обратного распространения для определения положения неоднородностей в  $E$ - и  $F$ -слоях ионосферы. В статьях [15–17] был предложен метод для измерения наклона и смещения плазменных слоёв относительно перигея радиолуча в ионосфере Земли и Венеры по радиозатменным данным, основанный на связи между вариациями ускорения фазового пути (эйконала) и интенсивностью радиозатменного сигнала.

Целями настоящей статьи являются: получение критерия, содержащего необходимое и достаточное условие для того, чтобы положение слоя, определяемого из радиозатменных экспериментов, совпадало с перигеем радиолуча; введение метода локации и измерения характеристик слоёв по радиозатменным данным. Предлагаемая техника анализа существенно дополняет основные принципы и имеет общее значение для радиозатменных измерений трёхмерной структуры атмосфер и ионосфер Земли и планет в широком диапазоне частот.

## 1. РАДИОЗАТМЕННЫЙ МЕТОД И КРИТЕРИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ СЛОЯ

Схема радиозатменных измерений показана на рис. 1. Высокостабильные радиосигналы, излучаемые спутником G, проходят через ионосферу и атмосферу вдоль луча GTL и регистрируются с помощью приёмника на борту другого спутника L. Амплитуда  $A(t)$  и изменения набег фазового пути (эйконала)  $\Phi(t)$  на несущей частоте регистрируются на борту спутника L в зависимости от времени  $t$ . Глобальная сферическая симметрия ионосферы и атмосферы с общим центром в точке O на рис. 1 является ключевым предположением при анализе данных радиозатменных экспериментов. При его выполнении малая область с центром в тангенциальной точке T, где радиолуч перпендикулярен градиенту показателя преломления, вносит главный вклад в вариации амплитуды и фазы радиозатменного сигнала, регистрируемого приёмником L, несмотря на существенно большую протяжённость пути вдоль лучевой траектории GTL [9]. Длина этой области на лучевой траектории GTL равна горизонтальному разрешению метода радиопросвечивания  $\Delta_h = 2(2l_f r_e)^{1/2}$ ,  $l_f = (\lambda d_2)^{1/2}$ , где  $l_f$  — размер зоны Френеля,  $\lambda$  — длина волны,  $r_e$  — длина отрезка TO,  $d_2$  — длина отрезка TL, приблизительно равная длине отрезка DL (рис. 1). Величина  $\Delta_h$  соответствует минимальной горизонтальной длине слоя, измеряемой радиозатменным методом. Вклад этой небольшой области в вариации амплитуды и фазы в стандартных ионосферных условиях существенно выше вклада оставшейся части пути GTL [9]. В условиях глобальной сферической симметрии тангенциальная точка, где радиолуч GTL перпендикулярен градиенту показателя преломления, совпадает с перигеем T лучевой траектории GTL. Радиозатменный метод позволяет определить с высоким вертикальным разрешением и точностью коэффициент преломления и его вертикальный градиент вдоль траектории движения перигея луча GTL.

Важное соотношение, связывающее ускорение  $a$  эйконала и рефракционное ослабление  $X_p(t)$  луча радиоволн, было получено ранее в работе [15] и имеет вид

$$1 - X_p(t) = ma, \quad a = d^2\Phi(t)/dt^2, \quad m = d_1 d_2 / (R_0 dp_s/dt)^2, \quad d_1 = R_0 - d_2, \quad (1)$$

где  $d_1$ ,  $d_2$  и  $R_0$  — расстояния вдоль прямых линий GD, DL и GL,  $p$  и  $p_s$  являются прицельными параметрами, соответствующими лучевой траектории GTL и линии прямой видимости GL. Величина  $m$  берётся из данных наблюдений со спутников. Расстояние  $d_2$  примерно равно длине дуги TL, поскольку угол рефракции  $\xi(p)$  (рис. 1) является малой величиной. В статье [18] показано,

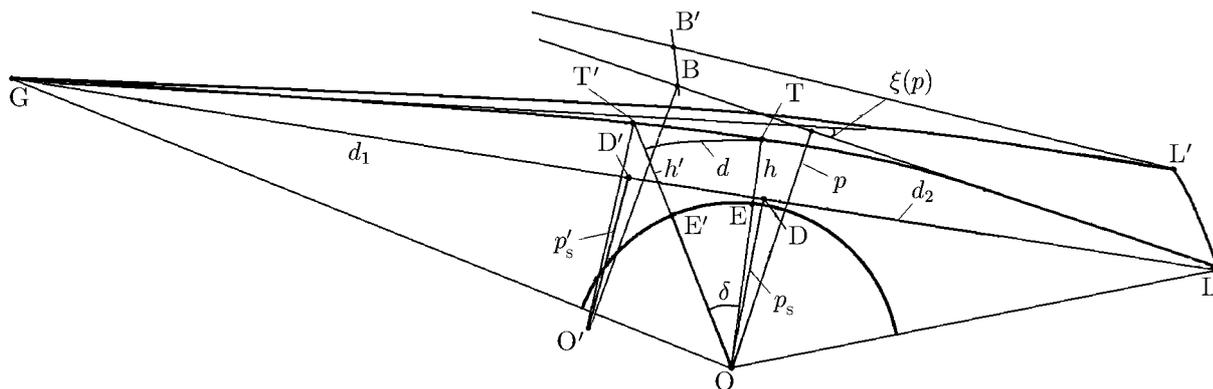


Рис. 1. Схема радиозатменного эксперимента

что соотношение (1) выполняется при условии

$$\left| (p - p_s) \frac{dR_{1,2}}{dt} \right| \ll \left| p_s \frac{dp_s}{dt} \right|, \tag{2}$$

где  $R_1$  и  $R_2$  — расстояния OL и OG соответственно. Условие (2) выполняется при радиозатменном зондировании атмосфер и ионосфер Земли и планет, поскольку модуль разности  $p - p_s$  практически во всех случаях много меньше прицельных параметров  $p$  и  $p_s$ .

Сформулируем критерий совпадения тангенциальной точки с перигеем луча. Для этого необходимо и достаточно выполнение требования глобальной сферической симметрии атмосферы и ионосферы, отсутствие многолучевого распространения, а также случайных неоднородностей. При выполнении указанных требований и отсутствии поглощения справедливо уравнение (1), из которого следует тождественное равенство рефракционных ослаблений, определённых из вариаций амплитуды и фазы радиозатменного сигнала:

$$X_p(t) \equiv X_a(t); \quad X_a(t) = I/I_0, \tag{3}$$

где  $I_0, I$  — интенсивности радиозатменного сигнала, измеренные до и после вхождения радиолуча в ионосферу. Интегральное поглощение  $\Gamma$  в атмосфере и/или ионосфере можно определить путём исключения рефракционного ослабления  $X_p(t)$ , найденного из измерений эйконала на одной частоте, с помощью уравнения (1) и соотношения  $\Gamma = 1 - X_a(t)/X_p(t)$  [13, 16].

Тождество (3) является математическим условием нахождения тангенциальной точки или атмосферного и/или ионосферного слоя в перигее радиолуча T. Удобно представить вариации рефракционных ослаблений, определённых из изменений эйконала и амплитуды радиозатменного сигнала на одной частоте, в форме аналитических функций, имеющих амплитуды  $A_p(t), A_a(t)$  и фазы  $\chi_p(t), \chi_a(t)$ :

$$1 - X_p(t) = ma = A_p(t) \text{Re exp}[j\chi_p(t)], \quad 1 - X_a(t) = ma = A_a(t) \text{Re exp}[j\chi_a(t)]. \tag{4}$$

Функции  $A_p(t), A_a(t)$  и  $\chi_p(t), \chi_a(t)$  могут быть найдены по известным временным зависимостям  $1 - X_p(t), 1 - X_a(t)$ , например с помощью численного преобразования Гильберта или других методов цифровой обработки данных. Если поглощение отсутствует, то при условии синхронных вариаций функций  $1 - X_p(t), 1 - X_a(t)$  с учётом (1) можно получить, что

$$A_p(t) = A_a(t), \quad \chi_a(t) = \chi_p(t). \tag{5}$$

В случае выполнения условия глобальной сферической симметрии уравнения (5) представляют другую форму упомянутого выше критерия.

Отклонения от указанного критерия могут быть связаны с многолучевым распространением, дифракцией, рассеянием, влиянием турбулентности и других неоднородностей в атмосфере и ионосфере. В некоторых случаях эти отклонения могут быть вызваны влиянием горизонтальных градиентов, появлением других тангенциальных точек в ионосферных частях радиолуча, например тангенциальной точки  $T'$  (рис. 1). Это приводит к смещению центра сферической симметрии из точки  $O$  в точку  $O'$  (рис. 1), и условие (2) принимает вид

$$\left| (p' - p'_s) \frac{dR'_{1,2}}{dt} \right| \ll \left| p'_s \frac{dp'_s}{dt} \right|, \quad (6)$$

где  $R'_1$  и  $R'_2$  — расстояния  $O'L$  и  $O'G$  соответственно.

Условие (6) также выполняется во всех практически важных случаях. При этом тангенциальная точка  $T'$  совпадает с новым перигеем радиолуча относительно центра  $O'$  и критерий (3) выполняется в форме

$$X'_p(t) \equiv X_a(t), \quad (7)$$

где  $X'_p(t)$  есть рефракционное ослабление, рассчитываемое из уравнения

$$1 - X'_p(t) = m'a, \quad a = d^2\Phi(t)/dt^2, \quad m' = d'_1 d'_2 / (R_0 dp'_s/dt)^2, \quad d'_1 = R_0 - d'_2, \quad (8)$$

где  $m'$  — значение параметра  $m$ , соответствующее центру сферической симметрии  $O'$  (рис. 1),  $d'_2$  — расстояние  $D'L$ ,  $p'_s$  — прицельный параметр, соответствующий линии прямой видимости  $GL$  и центру  $O'$ . Первое уравнение (7) отличается от уравнения (1) новыми значениями рефракционного ослабления  $X'_p(t)$  и множителя  $m'$  при том же самом значении ускорения эйконала  $a$ .

Соотношения (7) и (8) позволяют определить расстояние  $d$  между перигеем радиолуча  $T$  и новой тангенциальной точкой  $T'$  при отсутствии поглощения. Согласно уравнениям (1), (7) и (8), а также условию (6), должно выполняться уравнение (5):

$$A'_p(t) = A_a(t), \quad \chi'_p(t) = \chi_a(t), \quad (9)$$

где  $A'_p(t)$ ,  $\chi'_p(t)$  — амплитуда и фаза вариаций аналитического представления рефракционного ослабления  $1 - X'_p(t)$ . В силу определения (3) рефракционное ослабление, полученное из амплитудных экспериментальных данных, не зависит от положения центра сферической симметрии. Из (8), (9) следует, что функция  $A'_p(t)$  связана с амплитудами  $A_p(t)$  и  $A_a(t)$  соотношениями

$$A'_p(t) = \frac{m'}{m} A_p(t) = A_a(t); \quad A_p(t) = \frac{m}{m'} A_a(t). \quad (10)$$

Если смещение центра сферической симметрии удовлетворяет условиям

$$d_2/R_0, \quad d'_2/R_0 \ll 1; \quad dp_s/dt \approx dp'_s/dt, \quad (11)$$

то последнее из уравнений (10) можно представить в виде

$$A_a(t) = \frac{d'_2}{d_2} A_p(t). \quad (12)$$

Из (12) можно получить следующее соотношение для смещения  $d$  тангенциальной точки  $T'$  относительно перигея луча  $T$ :

$$d = d'_2 - d_2 = d_2 \frac{A_a - A_p}{A_p}; \quad d_2 = \sqrt{R_2^2 - p_s^2}. \quad (13)$$

Выражение (13) устанавливает следующее правило: смещение тангенциальной точки (точки поворота) лучевой траектории определяется отношением амплитуд  $A_a$  и  $A_p$ , полученных из вариаций интенсивности и эйконала радиозатменного сигнала. Смещение  $d$  положительно (отрицательно) в зависимости от знака разности  $A_a - A_p$ , а тангенциальная точка  $T'$  при этом расположена на части лучевой траектории GT или TL соответственно. В этом случае фазы  $\chi_p(t)$  и  $\chi_a(t)$ , должны быть равны в пределах точности, определяемой погрешностью измерений.

Выражение (13) справедливо, когда один из спутников находится от точки перигея T существенно дальше, чем другой спутник. Это условие выполняется, когда в радиозатменных экспериментах используются линии связи «космический аппарат—Земля» или при работе низкоорбитальных спутников с радиосигналами космических навигационных систем. По известной величине смещения  $d$  можно определить коррекцию высоты слоя  $\Delta h$  и его наклонение  $\delta$  по отношению к локальному горизонту [11]:

$$\delta = d/r_e, \quad \Delta h = d\delta/2, \quad (14)$$

где параметр  $r_e$  равен расстоянию TO (рис. 1).

Предложенная методика может быть сопоставлена с радиоголографическим методом определения положения плазменных неоднородностей ионосферы, введённым ранее в статьях [10, 14]. Согласно этим работам, для определения радиополёй между передатчиком и приёмником электромагнитное поле, измеренное вдоль орбитальной траектории LL', интегрируется с функцией Грина, соответствующей полю сферической волны в свободном пространстве. При этом в методе обратного распространения поле определяется вдоль прямых линий, касательных к радиозатменному лучу в любой точке на линии LL' [14]. Методом обратного распространения находится область, где амплитудная модуляция электромагнитного поля отсутствует или минимальна. Координаты этой области определяют положение неоднородности. Согласно работе [21], указанная область расположена вдоль фазового экрана (линия BB' на рис. 1), где лучи, соответствующие полю обратного распространения, перпендикулярны направлениям, проведённым из центра сферической симметрии O' (прямые O'B и O'B' на рис. 1). Кривая BB' близка к прямой линии, поскольку угол рефракции мал. Неточность определения длины отрезка T'L методом обратного распространения равна расстоянию между кривой BB' и точкой T': T'B  $\approx$   $p'\xi/2$  (рис. 1). В предложенном методе определяется смещение слоя  $d$  относительно перигея радиолуча. Поэтому систематическая погрешность введённого метода существенно меньше, чем метода обратного распространения.

## 2. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ СПУТНИКА СНАМР

Для иллюстрации возможности определить положение и наклон плазменных слоёв ниже используются данные спутника СНАМР, полученные с использованием радиосигналов навигационной системы GPS на частоте 1575,42 МГц (сеанс проведён 28 июля 2003 года, начало 21:08 LT, координаты перигея радиолуча 71,4° с. ш., 67,3° з. д.). Эти данные свидетельствуют о наличии интенсивных квазирегулярных амплитудных и фазовых вариаций радиозатменного сигнала. Рефракционные ослабления радиозатменных сигналов  $X_a$  и  $X_p$ , полученные в результате обработки вариаций интенсивности и эйконала, показаны на рис. 2a, кривые 1 и 2, в виде функций высоты перигея  $h$  лучевой траектории GTL. Ускорение эйконала  $a$  было определено численно двукратным дифференцированием полинома второй степени, построенного методом наименьших квадратов на скользящем временном интервале  $\Delta t = 0,5$  с. Временной интервал соответствует вертикальному размеру зоны Френеля порядка 1 км при скорости погружения радиолуча в ионосферу около 2,1 км/с. Рефракционное ослабление  $X_p$  получено с помощью уравнения (1) по найденным

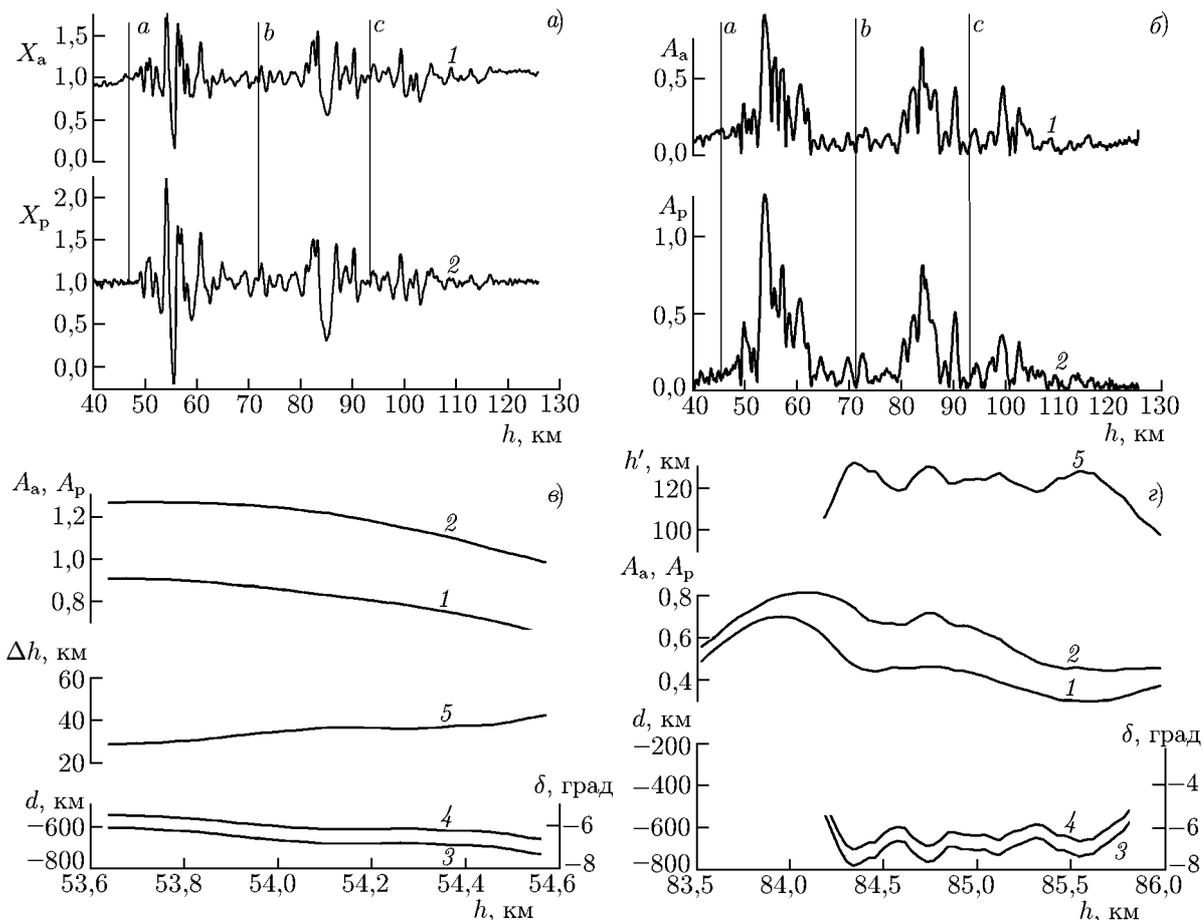


Рис. 2. Сравнение рефракционных ослаблений  $X_a$  и  $X_p$ , определённых по вариациям интенсивности и эйконала радиозатменного сигнала на частоте  $f_1$  навигационной системы GPS (кривые 1 и 2 на панели а). Амплитуда аналитических сигналов, соответствующих вариациям рефракционных ослаблений  $X_a$  и  $X_p$  (кривые 1 и 2 на панели б). Определение положения первого слоя с использованием амплитуд  $A_a$  и  $A_p$  (в). Определение положения второго слоя с использованием амплитуд  $A_a$  и  $A_p$  (г)

из экспериментальных данных значениям  $a$ . Величина  $t$  была взята из данных, переданных со спутников. Рефракционное ослабление  $X_a$  определялось из амплитудных данных с помощью метода наименьших квадратов с усреднением на том же временном интервале 0,5 с.

Вариации рефракционных ослаблений  $X_a$  и  $X_p$  являются когерентными, что указывает на равенство фаз  $\chi_a$  и  $\chi_p$ . Изменения ослаблений  $X_a$  и  $X_p$  вызваны, по-видимому, воздействием трёх ионосферных слоёв в трёх интервалах высоты перигея  $h$  лучевой траектории GTL, отмеченных на рис. 2а латинскими буквами  $a$ ,  $b$  и  $c$ . Интервалы  $a$ ,  $b$  и  $c$  соответствуют высоте  $h$  в диапазонах  $50 \div 72$  км,  $72 \div 92$  км и  $92 \div 116$  км соответственно. Сигналы  $X_a - 1$  и  $X_p - 1$  в указанных интервалах когерентны. Однако амплитуды  $A_a$  и  $A_p$  аналитических функций  $X_a - 1$  и  $X_p - 1$  в них различны.

Амплитуды  $A_a$  и  $A_p$ , определённые с помощью численного преобразования Гильберта, показаны на рис. 2б, кривые 1 и 2 соответственно. Амплитуда  $A_a$  в интервалах  $a$  и  $b$  меньше, чем соответствующие значения  $A_p$  (рис. 2б). Противоположный случай наблюдается в интервале  $c$  (рис. 2а, б). Первым двум слоям в интервалах  $a$  и  $b$  соответствуют отрицательные смещения  $d$ . Эти два слоя расположены на лучевой траектории GTL между точками T и L. Верхний слой с смещён из перигея радиолуча T в направлении к навигационному спутнику G (рис. 1).

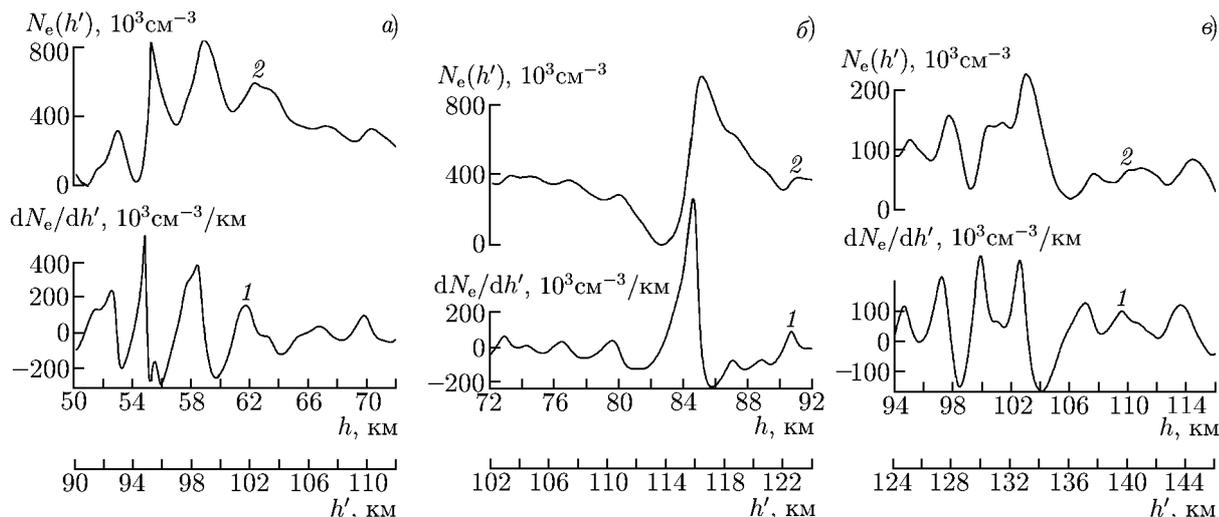


Рис. 3. Результаты определения электронной концентрации и её вертикального градиента: параметры  $d = -730$  км,  $\Delta h = 40$  км (а);  $d = -640$  км,  $\Delta h = 30$  км (б);  $d = 620$  км,  $\Delta h = 30$  км (в)

Предложенный метод может быть применён для определения положения ионосферного слоя на лучевой траектории GTL, поскольку вариации рефракционных ослаблений  $X_a$  и  $X_p$  когерентны. Результаты определения величины смещения  $d$  в интервалах  $a$  и  $b$  показаны на рис. 2в, г. Кривые 1, 2 и 3 на рис. 2в, г соответствуют высотной зависимости амплитуд  $A_a$  и  $A_p$  и смещения  $d$ . Кривые 4 на рис. 2в, г указывают наклон слоя  $\delta$ , выраженный в градусах (правая вертикальная ось). Кривые 5 иллюстрируют величину поправки к высоте  $\Delta h$  в км (рис. 2в) и скорректированной высоте слоя  $h'$  в км (рис. 2г) соответственно.

Изменения смещения  $d$  сконцентрированы в диапазонах от  $-630$  до  $-800$  км и от  $-600$  до  $-750$  км (интервалы  $a$  и  $b$  соответственно). Статистическая ошибка при определении отношения  $(A_a - A_p)/A_p$  с помощью уравнения (14) минимальна, если величина  $A_p$  максимальна. Если относительная ошибка в измерениях  $A_p$  равна 5%, то точность оценки  $d$  составляет примерно  $\pm 100$  км. Средние значения смещения в интервалах  $a$  и  $b$  равны  $d = -730$  и  $d = -620$  км соответственно. Смещение  $d$  в интервале  $c$  положительно и равно  $d = 620$  км. С помощью уравнения (15) можно найти наклоны плазменных слоёв  $a$ ,  $b$  и  $c$  к местному горизонтальному направлению, равные, соответственно,  $\delta = -7,3^\circ \pm 0,9^\circ$ ,  $\delta = -6,4^\circ \pm 0,9^\circ$  и  $\delta = 6,4^\circ \pm 0,9^\circ$ .

Локальная сферическая симметрия позволяет применить к решению обратной задачи преобразование Абеля и найти распределение электронной концентрации и её градиента в слое [16]. Полученные в результате зависимости концентрации электронов  $N_e(h')$  и её градиента  $dN_e/dh'$  показаны на рис. 3. Кривые 1 и 2 соответствуют градиенту  $dN_e/dh'$  и распределению электронной концентрации  $N_e$ , полученным из вариаций эйконала. Высота перигея радиолуча  $h$  и скорректированная высота  $h'$ , определённая с помощью предложенного выше метода, показаны на верхней и нижней горизонтальной оси на рис. 3а, б и в соответственно.

Слои  $a$  и  $b$  расположены на участке LT на расстояниях от точки Т, приблизительно равных 730 и 620 км с максимальными градиентами электронной концентрации на высотах 95 и 117 км соответственно (кривые 1 и 2 на рис. 3а, б). Слой  $c$  расположен на участке GT на расстоянии от точки Т примерно равном 620 км, максимальный градиент электронной концентрации находится на высоте 130 км. Согласно рис. 3 вариации градиента электронной концентрации в слоях  $a$ ,  $b$  и  $c$  сосредоточены в интервалах

$$-2,8 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}/\text{км} < dN_e(h)/dh < 5,3 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}/\text{км},$$

$$\begin{aligned} -2,2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}/\text{км} < dN_e(h)/dh < 7,8 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}/\text{км}, \\ -2,0 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}/\text{км} < dN_e(h)/dh < 3,2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}/\text{км}, \end{aligned}$$

соответственно. Эти величины типичны для интенсивных спорадических слоёв [19]. Высотный интервал амплитудных вариаций примерно равен высотному интервалу вариаций электронной концентрации и её градиента.

Согласно существующей теории, максимум содержания электронов в спорадических  $E$ -слоях обычно связан с положением границы ветрового сдвига [19]. Таким образом, радиозатменный метод может быть применён для определения положения границы ветрового сдвига в нижней ионосфере. Градиент концентрации электронов может соответствовать различным типам волновых фронтов. В случае внутренних гравитационных волн наклон волнового вектора к вертикальному направлению может быть использован для нахождения их угловой частоты [20]. Таким образом, предложенные критерии и методика расширяют область применения радиозатненного метода.

## ВЫВОДЫ

В настоящей работе получен аналитический критерий, позволяющий определять высоту, наклон и положение слоистых плазменных структур радиозатненным методом. В зависимости от знака разности рефракционных ослаблений, найденных по вариациям эйконала и интенсивности радиозатненного сигнала, смещение плазменного слоя относительно перигея радиолуча является положительным или отрицательным. В случае глобальной сферической симметрии ионосферы и атмосферы точка перигея радиолуча определяет высоту слоя. Результаты анализа вариаций радиозатненных сигналов, наблюдавшихся при высотах перигея радиолуча в интервале  $30 \div 90$  км, подтверждают эффективность разработанной методики определения положения слоёв в нижней ионосфере. Разработанная методика расширяет возможности радиозатненного метода для исследования атмосфер и ионосфер Земли и планет.

Работа поддержана РФФИ (грант 10-02-01015-а), а также программой 22 Президиума Российской академии наук.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kliore A., Cain D. L., Levy G. S., et al. // Science. 1965. V. 149. P. 1 243.
2. Яковлев О. И. Космическая радиофизика. М.: РФФИ, 1998. 431 с.
3. Яковлев О. И., Гришмановский В. А., Елисеев С. Д. и др. // Докл. АН СССР. 1990. Т. 315, № 1. С. 101.
4. Ware R., Exner M., Gorbunov M., et al. // Bull. Am. Met. Soc. 1996. V. 77, No. 1. P. 19.
5. Яковлев О. И., Павельев А. Г., Матюгов С. С. Спутниковый мониторинг Земли. Радиозатменный мониторинг атмосферы и ионосферы. М.: URSS, 2010. 208 с.
6. Liou Y. A., Pavelyev A. G., Matyugov S. S., et al. Radio occultation method for remote sensing of the atmosphere and ionosphere. INTECH, 2010. 170 p.
7. Occultations for probing atmosphere and climate / Ed. by G. Kirchengast, U. Foelsche, A. Steiner. Berlin: Springer, 2004. 408 p.
8. Kunitsyn V. E., Tereshchenko E. D. Ionospheric tomography. Berlin: Springer, 2003. 373 p.
9. Igarashi K., Pavelyev A., Hocke K., et al. // Adv. Space Res. 2008. V. 27, No. 6–7. P. 1321.
10. Sokolovskiy S. V., Schreiner W., Rocken C., Hunt D. // Geophys. Res. Lett. 2002. V. 29, No. 3. P. 621.

11. Wickert J., Pavelyev A. G., Liou Y. A., et al. // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31, No. 12. Art. no. L24801.
12. Павельев А. Г., Викерт Й., Лиу Й. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2008. Т. 51, № 1. С. 1.
13. Павельев А. Г. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2009. Т. 52, № 5–6. С. 363.
14. Gorbunov M. E., Gurvich A. S., Shmakov A. V. // *Int. J. Remote Sensing.* 2002. V. 23, No. 1. P. 675.
15. Liou Y. A., Pavelyev A. G. // *Geophys. Res. Lett.* 2006. V. 33, No. 23. Art. no. L23102.
16. Pavelyev A. G., Liou Y. A., Wickert J., et al. // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. Art. no. L21807.
17. Pavelyev A. G., Liou Y. A., Wickert J., et al. // *GPS Solutions.* 2010. V. 14, No. 1. P. 3.
18. Liou Y. A., Pavelyev A. G., Liu S. F., et al. // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing.* 2007. V. 45, No. 11. P. 3813.
19. Kelley M. C., Heelis R. A. *The Earth's ionosphere: plasma physics and electrodynamics.* Elsevier Science, 2009. 556 p.
20. Gubenko V. N., Pavelyev A. G., Andreev V. E. // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. Art. no. D08109.
21. Воробьёв В. В., Гурвич А. С., Кан В. и др. // *Исследования Земли из космоса.* 1997. № 4. С. 74.

Поступила в редакцию 8 декабря 2011 г.; принята в печать 25 марта 2012 г.

## ANALYTICAL METHOD FOR LOCATING IONOSPHERIC AND ATMOSPHERIC LAYERS BY RADIO OCCULTATION DATA

*A. G. Pavelyev, K. Zhang, C. Wang, Y. Liou, and Yu. Kuleshov*

The fundamental principle of the radio-occultation method for studying the atmospheres and ionospheres of the planets and the Earth is generalized. The criterion containing the necessary and sufficient condition on fulfillment of which the tangential point at which the refraction-index gradient is normal to the ray trajectory coincides with the radio-beam perigee is obtained. The method for determining the location and parameters of the ionospheric and ionospheric layers, which is based on the relationship between the amplitudes and phases of the analytical functions determined from variations in the phase path (eikonal) and the radio-occultation signal intensity, is proposed. This method yields qualitative and quantitative estimate of the value of the spatial shift of an ionospheric or ionospheric layer with respect to the radio-beam perigee and allows one to determine the altitude and inclination of ionospheric layer. The developed method is, in particular, required for determining the location and parameters of the wind-shift region and the direction of propagation of internal waves in the ionosphere and the atmosphere. This method is simpler and more accurate than the radiogolographic method of back propagation, which was previously used for locating ionospheric irregularities.