

нить «число ложных тревог» или частоту «пропуска предвестников» за определенный промежуток времени, например за год. Для расчета этих вероятностных характеристик при наличии помеховой обстановки (солнечная или грозовая активность) были разработаны признаки селекции «ложных тревог», возникающих в информационном тракте, включающем ионосферу, бортовой измерительный тракт и тракты приема и обработки информации в НПИМ и НПОИ.

Научно-технический потенциал системы «ОКО» позволяет проводить надежную селекцию сигналов в крупномасштабных полях обзора в самых экстремальных помеховых условиях.

В процессе функционирования комплекса «Матрица» будет создаваться база данных о сейсмо-ионосферных связях в интересах отработки геоинформационных технологий высокоточного определения коор-

динат эпицентров и времени вероятных катастрофических землетрясений, а также координат и времени проведения мощных взрывов.

Литература

1. Савин А.И., Болотов С.М., Гусева А.В. // Междунар. конф. «Женщины в экстремальных ситуациях. Защита прав и интересов женщин». М., 1997. Кн. 2. С. 69; 74.
2. Болотов С.М., Бондур В.Г., Гивишвили Г.В. и др. // Тез. докл. на Междунар. конф. «Эволюция инфосферы». М., 1995. С. 3.
3. Болотов С.М., Бондур В.Г., Виноградов В.В., Савин А.И. // Там же. С. 4.
4. Болотов С.М., Бондур В.Г., Савин А.И. // Тез. докл. на Междунар. конгр. «Окружающая среда для нас и будущих поколений». Красноярск, 1993. С. 2.
5. Pirogov Y.A., Savin A.I., Bolotov S.M. et al. // Second Wireless Power Transmission Conf. Kobe, Japan. 1995. P. 54.

УДК 551.510.5, 501.7; 537.87, 621.371

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИОНОСФЕРЫ И ПРОТОНОСФЕРЫ НА ТОЧНОСТЬ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ МЕТОДОМ РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЯ

В. И. Захаров, В. Е. Куницын

Показано, что среды распространения могут оказывать значительное влияние на точность получения метеопрофилей в эксперименте с использованием глобальных спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС. Возможно «затенение» атмосферных структур ионосферными или возникновение ложных возмущений на профилях. Получено, что неоднородные структуры ионосферы, подобные спорадическим образованиям, могут приводить к ошибкам в температурном профиле не меньше 1 К на высотах 10–35 км.

Введение

Метод рефрактометрического радиопросвечивания как источник информации о высотном ходе коэффициента преломления успешно применялся при исследованиях планетных атмосфер [1–3].

В простейшей схеме эксперимента один спутник наблюдает радиовосход другого спутника, на котором имеется передатчик электромагнитных волн. Для сферически слоистой атмосферы вертикальный профиль угла рефракции связан преобразованием Абеля с профилем показателя преломления. Вертикальное разрешение для радиоволн дециметрового диапазона определяется размером первой зоны Френеля (порядка 10^2 – 10^3 м). Горизонтальное разрешение определяется длиной пути луча в слое толщиной порядка высоты однородной атмосферы и составляет от нескольких сотен до нескольких тысяч километров в зависимости от изучаемой планеты.

При мониторинге земной атмосферы важны погодные вариации метеопараметров, что требует высокой точности определения самих метеопараметров. Технические характеристики реальных систем не позволяли применять для определения этих вариаций методы радиопросвечивания атмосферы Земли [2]. Тем не менее в ряде экспериментов на орбитальных станциях «Мир» и «Салют-7» получена уникальная информация о земной атмосфере [4, 5].

В настоящее время эти трудности преодолены. Функционируют глобальные спутниковые навигационные системы (Global Positioning System — GPS), например NAVSTAR и ГЛОНАСС, использующие частоты $f_1 = 1,57642$ ГГц и $f_2 = 1,2276$ ГГц с квантовой стабильностью. Система TOPEX/POSEIDON определяет координаты и скорости спутников с необходимой точностью. Рефрактометрические наблюдения из уникальных уже перешли в разряд серийных.

Ныне ошибки из-за влияния сред распространения

сигнала на точность восстановления метеопараметров сравнимы, а в ряде случаев и превосходят аппаратные погрешности. Динамика возмущений в этих средах накладывается на вариации метеопараметров. Целью данной работы является моделирование влияния неоднородных структур в разных ситуациях на точность восстановления метеопараметров в рефрактометрических экспериментах. Мы учитываем особенности влияния градиентных локализованных ионосферных структур типа спорадических слоев.

Моделирование прямой и обратной задач

Вариации углов рефракции ε и оптического пути S волн, излучаемых GPS-спутником, определяются из уравнений для лучей в двумерной среде [6, 7]:

$$\frac{d^2 r}{d\theta^2} = r + (2/r)(dr/d\theta)^2 + [(\partial n/\partial r) - (\partial n/\partial \theta)(dr/d\theta)/r^2][r^2 + (dr/d\theta)^2]/n(r, \theta), \quad (1)$$

$$dS/d\theta = n(r, \theta)[r^2 + (dr/d\theta)^2]^{1/2} \quad (2)$$

с граничными условиями $r(\theta_{\text{LEO}}) = r_{\text{LEO}}$, $r(\theta_{\text{GPS}}) = r_{\text{GPS}}$, $S(0) = 0$, где r и θ — координаты точки траектории луча. Индекс «GPS» соответствует GPS-спутнику, индекс «LEO» — низкоорбитальному ИСЗ (Low Earth Orbit); $n(r, \theta)$ — показатель преломления среды. Геометрия эксперимента представлена на рис. 1. В зависимости от разности углов θ_{GPS} и θ_{LEO} может наблюдаться радиовосход GPS-спутника, и в этом случае определяется угол рефракции ε_i в функции прицельного параметра p для каждой из частот f_i и значений прицельного угла φ_i , $i = 1, 2$.

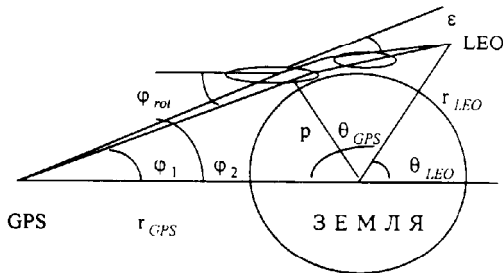


Рис. 1. Геометрия эксперимента

Зависимость $n(r, \theta)$ выбиралась в виде

$$n(r, \theta) = 1 + 10^{-6}[N_{\text{atm}}(r) + \delta N_{\text{atm}}(r, \theta, \dots) - (f_c^2/f^2)(N_{\text{ion}}(r) + \delta N_{\text{ion}}(r, \theta, \dots))], \quad (3)$$

где $N_{\text{atm}}(r)$ — высотный профиль индекса регулярной рефракции атмосферы, а $N_{\text{ion}}(r, \dots)$ — ионосферы, f_c — критическая частота регулярного ионосферного слоя.

При численном решении (1), (2) с учетом (3) можно использовать различные модели регулярных слоев и неоднородных структур. В данной работе для

модельного хода индекса рефракции атмосферы взят экспоненциальный профиль; высота однородной атмосферы 7 км, $N(0) = 287N$ -ед. Регулярные профили электронной концентрации соответствуют комбинациям простых слоев Чепмена при моделировании ионосферных слоев $F2$ и E , расположенных на высотах $250 \div 350$ и $100 \div 150$ км, с полутолщинами $100 \div 150$ и $10 \div 25$ км и максимумом электронной концентрации $n_e = 2 \cdot 10^6$ и $2 \cdot 10^4 \div 2 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ соответственно.

Появление возмущений в атмосфере и ионосфере учтено в (3) членами $\delta N(\dots)$ с соответствующим индексом. Положение центра возмущения над Землей имеет координаты $h_{\text{inh}}, \theta_{\text{inh}}$, форма задается частью кольца (с размерами $\Delta\theta_{\text{inh}}$ и Δr_{inh}) или эллипсом (с осями a_{inh} и b_{inh}). В качестве функции модуляции амплитуды возмущения выбраны гауссова и функция, пропорциональная $\cos^2(r_{\text{inh}}, \theta_{\text{inh}})$. Параметры неоднородностей приведены в таблице ($N_{\text{atm}}(h)$ — значение индекса рефракции атмосферы на высоте h от поверхности Земли).

Геометрия эксперимента по просвечиванию может оказаться такой, что луч пройдет вдоль неоднородности, ориентированной по магнитной силовой линии, что не может быть описано сферическими структурами. Кроме того, слои типа спорадических не описываются гауссовым профилем. Поэтому наряду с гауссовыми [6, 7] в работе используются эллиптические неоднородности с возмущением, пропорциональным $\cos^2(r_{\text{inh}}, \theta_{\text{inh}})$, вращающиеся вокруг своего центра (см. рис. 1) на угол φ_{rot} , отсчитываемый от траектории луча.

Параметры неоднородностей

Параметры возмущения	Атмосфера	Ионосфера
1. Положение h_{inh} , км θ_{inh} , град	$1 \div 12$ Перигей луча	$80 \div 600$ Перигей луча $\pm 10^\circ$
2. Размеры Δr_{inh} , км $\Delta\theta_{\text{inh}}$, град (или a_{inh} и b_{inh} , км)	$1 \div 3$ $0,5 \div 5$	$1 \div 25$ $0,5 \div 10$ ($150 \div 300$ и $5 \div 30$)
3. Амплитуда	$(0,01 \div 0,3)N_{\text{atm}}(h)$	$(0,01 \div 0,75)n_e$

Точность решения уравнений (1), (2) с учетом (3) и данных таблицы обусловлена точностью определения координат спутников и составляет $2 \div 10$ см. В ходе моделирования рассчитывалась зависимость угла рефракции ε от прицельного параметра луча p с шагом по высоте менее 100 м в атмосфере и -1 км в ионосфере ($h > 60$ км) для лучей с частотами f_1 и f_2 . Компенсация влияния ионосферы осуществлялась по двухчастотному методу [7], как показывают исследования, наиболее точному по сравнению с одностотными:

$$\varepsilon = (f_1^2 \varepsilon_1 - f_2^2 \varepsilon_2)/(f_1^2 - f_2^2), \quad (4)$$

где ε_i — угол рефракции в атмосфере луча с частотой f_i , $i = 1, 2$. Зависимость $\varepsilon_i(p)$ использовалась для восстановления $n(r)$:

$$n_i(x) = \exp \left[\frac{1}{\pi} \int_x^H \frac{\varepsilon(p) dp}{\sqrt{p^2 - x^2}} \right], \quad x = r n(r), \quad (5)$$

где H — верхняя условная граница атмосферы. Вертикальный профиль показателя преломления $n_i(r)$ принято относить к точкам перигеев лучей.

В радиодиапазоне показатель преломления имеет вид

$$n = 1 + c_1 P/T + c_2 P_w/T^2, \quad (6)$$

где T , P , P_w — соответственно температура (К), давление (мбар) и парциальное давление водяного пара (мбар); $c_1 = 7,76 \cdot 10^5$ К/мбар, $c_2 = 0,373$ К²/мбар. Полагая в (6) $P_w = 0$, вычисляли профиль плотности воздуха $\rho(h)$, а из барометрической формулы и уравнения состояния газа — вертикальные профили давления $P(h)$ и температуры $T(h)$:

$$\begin{aligned} \rho(h) &= [n(h) - 1]/(c_1 R), \\ P(h) &= \int_h^H g(z) \rho(z) dz, \\ T(h) &= P(h)/R\rho(h), \end{aligned} \quad (7)$$

где R — универсальная газовая постоянная и $g(z)$ — зависимость ускорения свободного падения от высоты.

Полученные профили $n(h)$ сравнивались с модельными. Формулы (7) справедливы для высот $h > 5 \div 8$ км, когда влиянием водяного пара можно пренебречь. Для ошибок δT , δP , $\delta N = \delta(n - 1)$ имеем $\delta T/T = \delta P/P = \delta N/N$, ошибки δN пропорциональны ошибкам метеопрофилей.

Ошибки восстановления метеопараметров

Условно эти ошибки можно разделить на три группы. К первой относятся аппаратные погрешности. Так, при фазовой ошибке приемной системы $0,5^\circ$ ошибка в температурном профиле составляет менее 4 К в диапазоне высот $10 \div 35$ км, а при частотной стабильности не хуже 10^{-12} — менее 1 К [8].

Во вторую группу входят ошибки, связанные с используемым методом восстановления. Преобразование Абеля малочувствительно к горизонтальным градиентам получаемого профиля $n(h)$ [6]. Ошибки зависят и от верхнего предела в (5). Исследования [9] показывают, что относительные ошибки восстановления в диапазоне высот до 20 км составляют $\sim 0,1\%$ для оптимальной высоты проведения наблюдений.

Третья группа ошибок связана с влиянием сред распространения сигнала. Протоносфера и ионосфера являются диспергирующими средами. Если луч одной частоты проходит через неоднородность, лежащую в стороне от луча с другой частотой, то в двухчастотном методе коррекции [7] это учесть нельзя.

Метеорологические вариации $n(h)$ в атмосфере [10] равны или больше, чем в ионосфере. Это означает, что ионосферные неоднородности могут «затенять» атмосферные структуры или приводить к появлению артефактов на профиле.

Протоносфера не имеет сферической симметрии, но обладает сложной оболочечной структурой. Вклад протоносферы в интегральную электронную концентрацию (вдоль луча распространения) сравним с ионосферным [11]. По нашим оценкам, расхождение лучей разных частот в протоносфере может достигать десятков процентов от расхождения в ионосфере, а угол рефракции в протоносфере $\sim 1 \div 10\%$ ионосферного. Поэтому ниже обсуждаются результаты, полученные для ионосферы.

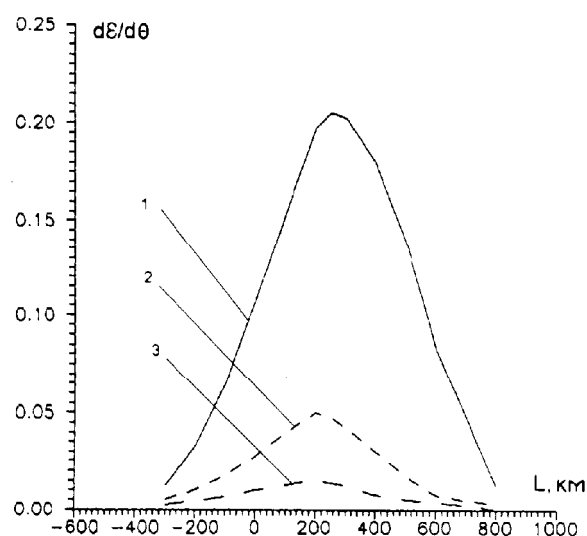


Рис. 2. Область рефракции в атмосфере. Высота перигея луча: 0,05 (1), 10 (2) и 50 км (3)

Основные результаты

На рис. 2 представлена зависимость дифференциального угла рефракции $d\varepsilon/d\theta$ от расстояния вдоль земной поверхности L для различных высот точки перигея зондирующего луча. Положение нуля по оси абсцисс соответствует проекции на поверхность Земли точки перигея, высота которого равна радиусу орбиты ЛЕО-спутника. С ростом высот перигея рефракция в атмосфере уменьшается, а максимумы кривых смещаются друг относительно друга на расстояния порядка сотен километров. Эти результаты совпадают с результатами [8]. Однако толщина области перепада метеопараметров [6, 10] может составлять десятки километров, и потому профиль не восстанавливается с заданной точностью.

Структуры типа тонкого ионосферного спорадического слоя являются источником дополнительных ошибок. При этом важнейшим обстоятельством является факт попадания луча в неоднородность, что возможно при зондировании. На рис. 3 представлены зависимости $\varepsilon(h)$ в неоднородной ионосфере для различной ориентации эллиптической неоднородности,

расположенной на высоте 150 км, с осями a и b соответственно 100 и 25 км и амплитудой $\Delta n_e = 0,5n_e$. Поворот неоднородности на угол φ_{rot} приводит к изменению угла рефракции — неоднородность «блестит», а максимум изменения достигается при ориентации неоднородности вдоль зондирующего луча.

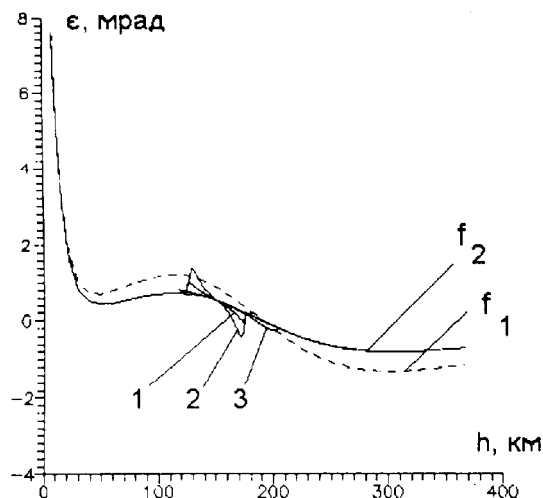


Рис. 3. Возмущения профиля рефракции для частот f_1 и f_2 при повороте спорадической неоднородности на угол $\varphi_{\text{rot}} = 5^\circ$ (1), 10° (2) и 34° (3)

Дополнительным источником ошибок может быть многолучевость одночастотных сигналов при распространении в атмосфере–ионосфере–протоносфере. В частности, дополнительный сигнал может появляться при отражениях от ионосферных слоев, от Земли и т. п. Например, отражение от спорадического слоя с критической частотой $f_c = 3\text{--}5$ МГц происходит в широком диапазоне частот порядка 1 МГц [12]. В таком случае при скользющем угле падения порядка отношения $f_c/f = (0,1\text{--}0,2)^\circ$, будет наблюдаться кроме прошедшего достаточно сильный отраженный сигнал. Аналогично может наблюдаться отражение от E_s и F слоев ионосферы, но здесь диапазон полупрозрачности существенно уже и поэтому возможно частичное отражение на частоте f_1 при отсутствии отражения на частоте f_2 .

В регулярной ионосфере величина радиального смещения $R(f)$ луча частоты f_1 относительно луча f_2 зависит от прицельного угла φ_1 и θ_{LEO} (см. рис. 1). Расхождение лучей максимально в случае полного прохождения лучами ионосферы (расстояния порядка нескольких тысяч километров) и составляет $\sim 1,5$ км (рис. 4). При этом возможны ситуации, когда луч одной частоты попадает в неоднородную структуру, а второй проходит «по краю». Это иллюстрирует рис. 5, на котором представлены ошибки восстановления высотных профилей $n(h)$ для регулярной атмосферы и при наличии возмущения в ионосфере ($h_{\text{inh}} = 100$ км, $\Delta r_{\text{inh}} = 10$ км, $\Delta \theta_{\text{inh}} = 1^\circ$, $\Delta n_e = 0,5n_e$), а угловое положение неоднородности меняется так, что в геометрии

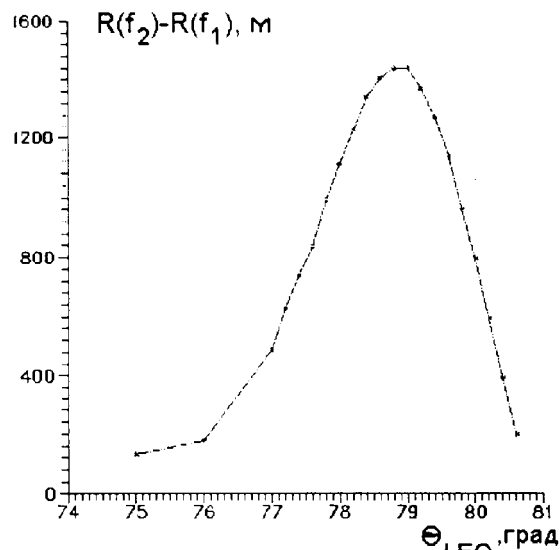


Рис. 4. Радиальное расхождение лучей двух частот в ионосфере

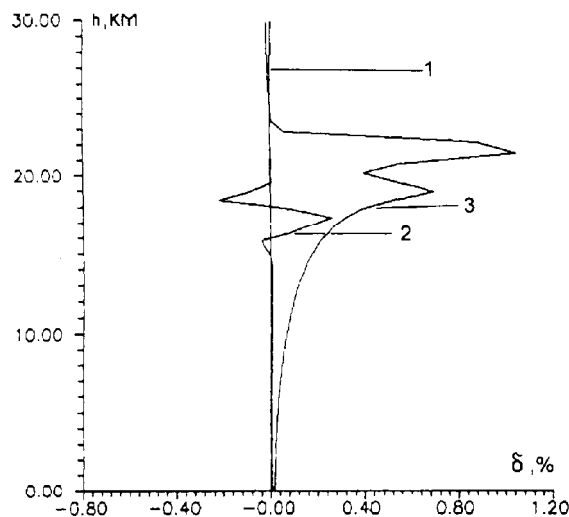


Рис. 5. Ошибки восстановления δ регулярного атмосферного профиля в различных случаях влияния спорадической ионосферной неоднородности (обозначения кривых разъяснены в тексте)

эксперимента зондирующие лучи минуют неоднородность (кривая 1), проходят около края (2) и один из лучей проходит вдоль неоднородности через ее центр (3). В сложных ситуациях из-за ионосферных неоднородностей ошибки восстановления метеопрофилей для диапазона высот $8\text{--}35$ км могут достигать величин $0,5\text{--}1,5\%$, в регулярных случаях уменьшаясь до $0,1\%$, что соответствует выводам [7]. Это соответствует ошибке при восстановлении, например, температурного профиля не менее 1 К. Кроме того, на восстанавливаемом профиле при определенных условиях обнаруживаются артефакты, обусловленные протоносферным и ионосферным влиянием, а ионосферные неоднородности «затеняют» атмосферные вариации $n(h)$, обусловленные малыми (несколько процентов) изменениями метеопараметров. В ряде практически важных случаев может возникать многолуче-

вое распространение зондирующего сигнала из-за отражения от Земли или скользящего падения на неоднородности сред распространения. Возможность учета таких ситуаций требует особого рассмотрения.

Выводы

Неоднородная структура сред распространения сигнала может оказывать значительное, иногда определяющее влияние на точность восстановления вертикальных профилей метеопараметров в эксперименте с использованием GPS. Возможно «затенение» атмосферных неоднородностей ионосферными или возникновение ложных возмущений на профиле. Характерные атмосферные возмущения ($1 \div 5\%$ относительно регулярных значений) могут компенсироваться влиянием спорадических структур, лежащих на одном зондирующем луче.

Коррекция влияния ионосферы с использованием (4) в случае неоднородностей может приводить к ошибкам восстановления профилей не меньше 0,5%, что в диапазоне высот 10–35 км для профиля температуры составляет не меньше 1 К. Низкое горизонтальное разрешение является источником дополнительных ошибок. С высотой ошибки растут из-за относительного роста влияния ионосферы и процессов стратификации в атмосфере.

Итак, увеличение точности определения метеопараметров атмосферы Земли для экологических приложений возможно в случае комплексной диагностики сред распространения зондирующего излучения при получении информации разными методами спутникового и наземного мониторинга.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 96-05-65875 и 98-05-64952).

Литература

1. *Phinney R.A., Anderson D.L.* // J. Geophys. Res. 1968. **73**, No. 5. P. 1819.
2. *Татарский В.И.* // Изв. АН СССР, ФАО. 1968. **4**, № 8. С. 811.
3. *Яковлев О.И.* Распространение радиоволн в космосе. М., 1985.
4. *Волков А.А., Гурвич А.С., Соколовский С.В.* // Изв. АН СССР, ФАО. 1987. **23**, № 11. С. 1228.
5. *Яковлев О.И., Гришмановский В.А., Елисеев С.Д. и др.* // ДАН. 1990. **315**, № 1. С. 101.
6. *Гурвич А.С., Соколовский С.В.* // Изв. АН СССР, ФАО. 1985. **21**, № 1. С. 12.
7. *Воробьев В.В., Красильникова Т.Г.* // Изв. РАН, ФАО. 1993. **29**, № 5. С. 626.
8. *Hoeg P., Syndergaard S., Hauchecorne A. et al.* Derivation of Atmospheric Properties Using a Radio Occultation Technique: ESA Rep. ESTEC/11024/94/NL/CN. Copenhagen, Denmark, 1995.
9. *Горбунов М.Е.* // Изв. РАН, ФАО. 1994. **30**, № 6. С. 776.
10. *Козаков Л.Я., Ломакин А.Н.* Неоднородности коэффициента преломления воздуха в тропосфере. М., 1976.
11. *Klobuchar J.A., Doherty P.H., Davies K.* // Proc. Int. Beacon Sattel. Symp. Aberystwyth, 1994. P. 1.
12. *Куницын В.Е., Усачев А.В.* // Геомагнетизм и аэрономия. 1988. **28**, № 5. С. 855.