

## Планетарный мониторинг D-области ионосферы космическими радиосредствами

П.М. Нагорский, В.В. Зуев

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН  
634021, г. Томск, пр. Академический, д.10/3, ИМКЭС СО РАН, nrm\_sta@mail.ru

*Предложен метод оценки состояния области D и основания области E ионосферы средствами космического базирования, основанный на анализе дифференциального поглощения радиоволн обыкновенной и необыкновенной поляризации в нижней ионосфере. Проведен модельный анализ данных спутникового ионосферного зондирования в полосе частот, превышающих частоту отсечки  $f_xF2$ . Результаты численных экспериментов показали перспективность использования этой полосы частот зондирования для глобального контроля состояния области D ионосферы космическими радиосредствами.*

*In work the method of estimation of area condition and the basis of area of ionosphere by the space means, based on the analysis of differential absorption of radio-waves in the bottom ionosphere is offered. On the basis of the modelling analysis of the data ionospheric sounding in a strip of the frequencies exceeding frequency  $f_xF2$ , perspectivity of use of this strip of frequencies of sounding for the global control of a condition of area D of an ionosphere is shown.*

### Введение

К настоящему времени накоплено большое количество экспериментальных данных, свидетельствующих о существовании сейсмо-ионосферных связей, включая изменения в различных областях ионосферы в периоды подготовки сильных землетрясений [1-3]. В основном эти данные касаются областей E и F. Данных по изменениям параметров области D – существенно меньше.

Последнее связано с тем, что область D, как ни одна другая область ионосферы, является недостаточно исследованной. Это обусловлено как её составом и динамикой, так и отсутствием средств и методов, позволяющих вести регулярный мониторинг в районах с высокой сейсмической активностью [4, 5].

### 1. Постановка задачи

При зондировании ионосферы с борта космических аппаратов анализ данных ионозондов ограничивается полосой частот от критической частоты области F ( $f_oF2$ ) до частот плазменных резонансов. Информация, заключенная в сигнале с частотой  $f > f_oF2$ , дважды прошедшем через ионосферу и отраженном от земной поверхности, фактически остается без должного анализа. Плазменная частота  $\omega_e$  в области D много меньше частот зондирования, для которых область F – радиопрозрачна. Наличие столкновений и геомагнитного поля приводит к тому, что показатель преломления в плазме становится комплексной величиной  $n = kc/\omega = \mu + i\chi$ , где  $k$  – длина волнового вектора,  $\mu, \chi$  – реальная и мнимая части  $n^2$ ,  $\mu^2 - \chi^2 = \epsilon'$ ,  $2\mu\chi = \epsilon''$ . Поглощение необыкновенной компоненты в области D больше обыкновенной, а поглощение обыкновенной компоненты меньше, чем в отсутствие магнитного поля. Таким образом, в разнице уровней принятых сигналов заключена информация об интегральном поглощении в области D.

### 2. Модельное описание влияния области D на зондирующий сигнала

Следуя [6], положим: – на выходе передатчика спутникового ионозонда существует волна линейной поляризации, расщепляющаяся в плазме на две магнитоионных компоненты с амплитудами  $A_x^o = A_o^o$ ; – результирующее поле вдоль луча, связывающего передатчик, область отражения от земли и приемник, имеет вид  $A_{o,x} = \frac{A_{o,x}^o}{\sqrt{F}} \exp \left[ -2 \int_{h_c}^{h_{\text{отп}}} \xi_{o,x} dh \right]$ , где  $F$  – геометрическая расходимость; – земная поверхность является плоской, а магнитоионные компоненты распространяются по совпадающим траекториям. Тогда отношение амплитуд обеих компонент будет изменяться только из-за поглощения и дисперсионного расплывания, и отношение уровней зарегистрированных сигналов  $R$  равно:

$$R = \frac{A_x}{A_o} = \Theta_{x,o} \cdot \exp \left[ -2 \int_{h_c}^{h_{\text{отп}}} (\xi_x - \xi_o) dh \right], \quad (1)$$

где  $\xi = \omega/c \operatorname{Im} \sqrt{\hat{\epsilon}}$  – коэффициент затухания,  $\Theta_{x,o}$  – коэффициент, учитывающий различное падение амплитуды обеих магнитоионных компонент зондирующего импульса вследствие дисперсионного расплывания в ионосфере. Аналогичное соотношение получается при использовании зондирующих импульсов одной круговой поляризации, но с различными частотами. Таким образом, для модельной оценки времени запаздывания и потерь при зондировании необходимо распределение  $n(\omega_e, \nu_e, \Omega_e)$  и  $\chi(\omega_e, \nu_e, \Omega_e)$ . В качестве модели ионосферной плазмы воспользуемся моделью ионосферы IRI [7], а для определения нейтрального состава области  $D$  – моделью термосферы MSIS [8].

Роль дисперсии в изменении амплитуды и длительности регистрируемых сигналов оценим по соотношению  $\Delta \tau_{\text{и}} = \frac{2}{c} \int_{h_c}^{h_{\text{отп}}} \left( \frac{1}{n(h, f_{\text{н}})} - \frac{1}{n(h, f_{\text{в}})} \right) dh$ , где  $f_{\text{н}}$  и  $f_{\text{в}}$ , верхняя и нижняя частоты спектральной полосы зондирующего импульса, и для  $\Theta_{x,o}$  запишем:  $\Theta_{x,o} = \sqrt{(\tau_{\text{и}} + \Delta \tau_{\text{и}}^o) / (\tau_{\text{и}} + \Delta \tau_{\text{и}}^x)}$ . Здесь  $\tau_{\text{и}}$  – начальная длительность импульса. В итоге получим соотношение, позволяющее оценить поглощение сигнала в  $D$ -области:

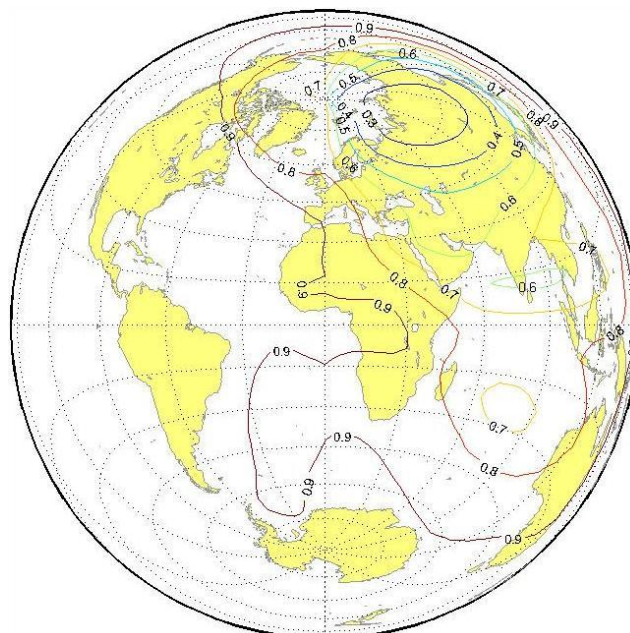
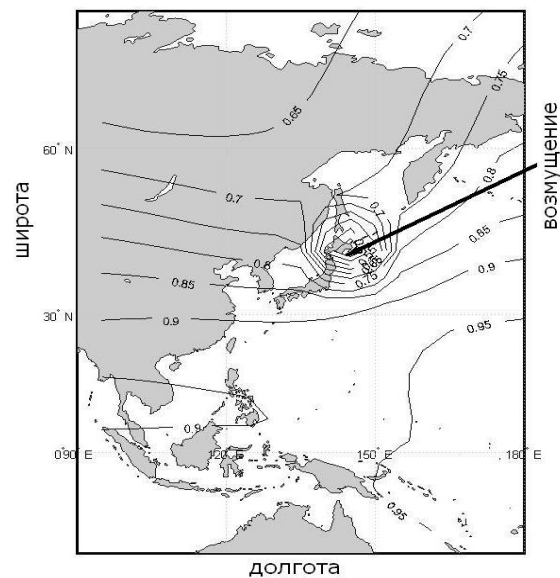
$$\int_{h_c}^{h_{\text{отп}}} (\xi_x - \xi_o) dh = \frac{1}{2} \ln \left[ \frac{A_o}{A_x} \cdot \sqrt{\frac{(\tau_{\text{и}} + \Delta \tau_{\text{и}}^o)}{(\tau_{\text{и}} + \Delta \tau_{\text{и}}^x)}} \right] = \ln \left[ \sqrt{\Theta_{x,o} / R} \right]. \quad (2)$$

### 3. Анализ данных моделирования

Проведем оценку величины  $R$  для случаев локального и глобального (от солнечной вспышки) возмущений в области  $D$ . Положим, что гелио и геомагнитная активности – невысоки:  $F_{10.7} = 107$ ,  $Ap = 4$ . Расчеты проведем для летнего солнцестояния для 06UT и частоты зондирования  $f_i = fx F2(\theta, \varphi) + 0.1$  [МГц]. Возмущение величины  $N_e \cdot \nu_e$  представим в следующем виде:

$$N_e \cdot \nu_e = N_{e0} \cdot \nu_{e0} \cdot \left[ 1 + Am \cdot \prod_{k=1}^3 \begin{cases} \left( 1 - (x_k - x_{ko})^2 / \Delta x_k^2 \right)^2, & (x_k - x_{ko})^2 / \Delta x_k^2 \leq 1 \\ 0, & (x_k - x_{ko})^2 / \Delta x_k^2 > 1 \end{cases} \right]. \quad (3)$$

Здесь  $\vec{x}$  – текущие координаты,  $\vec{x}_0$  – координаты местоположения центра возмущения,  $\Delta x = (\Delta h, \Delta \theta, \Delta \varphi)$  – пространственные размеры возмущения. При моделировании локального возмущения полагалось:  $\Delta \theta = 8^\circ$ ,  $\Delta \varphi = 11^\circ$ ,  $\Delta h = 20$  км,  $Am = 10$  в точке с координатами  $42.25^\circ$  с.ш.,  $145^\circ$  в.д. Результаты расчетов представлены на рис. 1 а, б. Плавное уменьшение величины  $R$  с юга на север в невозмущенных условиях (рис. 1 а) обусловлены уменьшением критической частоты слоя  $F2$  с широтой. Аналогичное уменьшение  $R$  с востока на запад связано с перестройкой ионосферы в вечернее время суток. Стрелкой на той же карте указано местоположение локального возмущения.

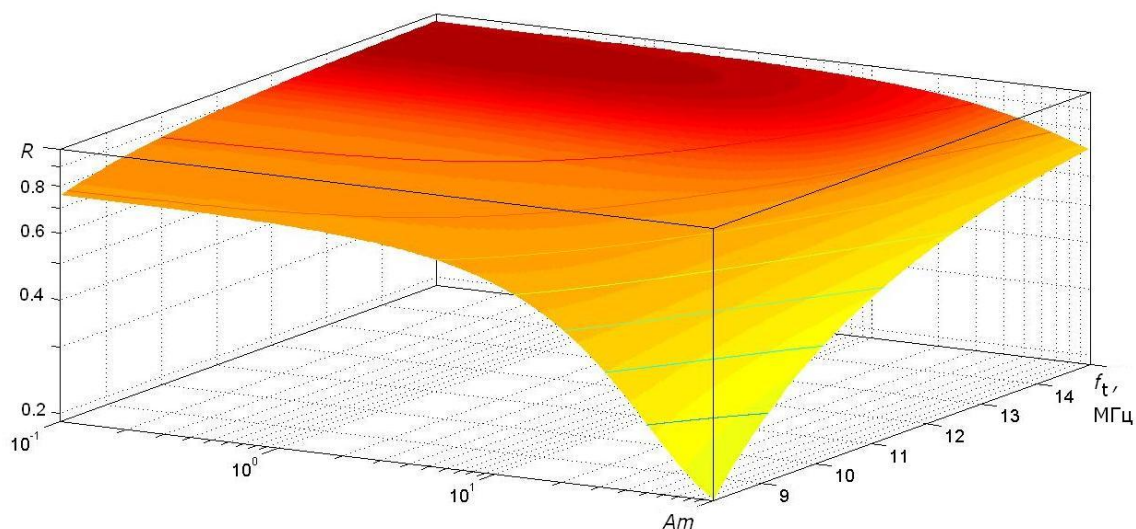


а

б

Рис. 1. Планетарное распределение  $R$ , рассчитанное для локального (а, слева) и глобального от вспышки (б, справа) возмущений на высоте  $h = 1000$  км.

Рассмотрим зависимость поглощения от относительной амплитуды возмущения и частоты зондирования. Результаты моделирования для локального возмущения представлены на рис. 2.



**Рис. 2.** Зависимость дифференциального поглощения  $R$  от  $Am$  и  $f_t$ .

Анализ данных моделирования показал, что частотный интервал, в котором данный метод позволяет проводить измерения, определяется значениями  $Am$  и  $f_t$ : при малых  $Am$  и  $f_t$ , значительно превышающих  $f_x F2$ , обе магнитоионные компоненты испытывают слабое поглощение, а оценка поглощения в области  $D$  проблематична, в случае больших  $Am$  отношение амплитуд  $R \rightarrow 0$  и оценка поглощения также становится затруднительной. Оптимальные для измерений значения  $R$  лежат в диапазоне от 0.1 до 0.9.

### **Заключение**

На основе модельного анализа данных спутникового ионосферного зондирования в полосе частот, превышающих частоту отсечки  $f_x F2$ , показана перспективность использования этой полосы частот зондирования для оперативного контроля состояния области  $D$  ионосферы.

Наличие отражающей поверхности не требует увеличения мощности бортового передатчика, а расположение аппаратуры на спутнике позволяет осуществить планетарный мониторинг области  $D$ , включая области, расположенные над сейсмоактивными регионами планеты.

*Выполнено при поддержке проектов СО РАН № VII.63.3.1, Президиума РАН № 16.10 и ФЦП № 02.740.11.0738.*

### **Литература**

1. Чернявский Г.М., Скребушевский Б.С., Скрипачев В.О. Бортовая аппаратура космических аппаратов мониторинга предвестников землетрясений // Исследование Земли из космоса. – 2004. – № 6. С. 50 – 58.
2. Липеровский В.А., Похотелов О.А., Мейсткр К.-В., Липеровская Е.В. Физические модели связей в системе литосфера-атмосфера-ионосфера перед землетрясениями // Геомагнетизм и аэрономия. – 2008. – Т.48. – № 6. С. 831 – 843.

3. Pulinets S.A., Boyarchuk K.A., Hegai V.V. et al. Quasielectrostatic model of atmosphere-thermosphere-ionosphere coupling // *Adv. Space Res.* – 2000. – V.26. – № 8. P. 1209 – 1218.
4. Зуев В.В., Ельников А.В., Бурлаков В.Д. Лазерное зондирование средней атмосферы. Томск: Раско. 2002. – 352 с.
5. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. – 527с.
6. Зуев В.В., Нагорский П.М. Метод оценки состояния области D ионосферы радиосредствами космического базирования // *Исследование земли из космоса.* – 2011. – № 4. – С.33–40.
7. Rawer K., Bilidza D., Ramakrishnan S. Goals and Status of the IRI // *Rev. Geophys. Spase Phys.* – 1987. – V.16. – № 2. P. 177 – 181.
8. Hedin A.E. Neutral Atmosphere Empirical Model from the surface to lower exosphere MSIS90 // *J. Geophys. Res.* – 1991. – V.96. P. 1159 – 1172.