

### **ВЧ радиолокация искусственных магнитно-ориентированных неоднородностей с орбиты ИСЗ**

В.Ю. Ким

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им Н.В. Пушкова Российской академии наук, 108840, г. Москва, г. Троицк, e-mail: vkim@izmiran.ru*

*Рассмотрена задача мониторинга области искусственного возмущения ионосферы путем наблюдения на орбите искусственного спутника Земли сигналов ракурсного рассеяния радиоволн от искусственных магнитно-ориентированных ионосферных неоднородностей, возбуждаемых в ионосфере при нагреве мощными радиоволнами. Исследована геометрия бистатической радиолокации с помощью спутникового ионозонда, когда зондирующий передатчик находится на поверхности Земли. Оптимальная геометрия наблюдения исследовалась путем численного моделирования лучевых траекторий зондирующей и рассеянной радиоволн. Получено, что при бистатической радиолокации за счет захвата радиоволн в ионосферный волновой канал возможен прием на ИСЗ сигналов ракурсного рассеяния на расстояниях более 4000 км от области искусственного возмущения ионосферы.*

*The problem is discussed of monitoring the artificial disturbance of the ionosphere by observing, in the orbit of an artificial earth satellite, signals scattering from field-aligned artificial ionospheric irregularities, excited by powerful radio wave heating. The geometry of bistatic radiolocation with the help of a satellite ionosonde is investigated, when the sounding transmitter is located on the surface of the Earth. The optimal observation geometry was investigated by numerical simulation of beam trajectories of the probing and scattered radio waves. It is found that with bistatic radiolocation due to the capture of radio waves into the ionospheric wave channel, it is possible to receive on the satellites the signals scattering at distances greater than 4000 km from the region of artificial disturbances of the ionosphere*

#### **Введение**

Ракурсное рассеяние (РР) радиоволн КВ- и УКВ-диапазонов на области искусственного возмущения в ионосфере, обнаруженное в 70-е годы прошлого века при нагревных экспериментах в Боулдере (США) [1], было важным свидетельством того, что при воздействии мощного радиоизлучения в ионосфере образуются мелкомасштабные искусственные ионосферные неоднородности (МИИН). Возникающие при нагреве мелкомасштабные неоднородности с характерными масштабами  $\sim 1$  км имеют сильно вытянутую вдоль геомагнитного поля форму, с весьма малыми поперечными масштабами  $\sim 0.1 - 10$  м и такие искусственные неоднородности приводят к анизотропному рассеянию радиоволн [2, 3]. Измеренное в этих наблюдениях полное радиолокационное сечение рассеяния от области возмущения (ОВ) достигало весьма больших значений - до  $10^9$  м<sup>2</sup>, что вполне обоснованно было охарактеризовано как «гигантское», [4]. Для экспериментального исследования эффектов РР использовались моностатическая и бистатические схемы при наземном расположении зондирующих передатчика и приемника. В работе [5] было показано, что за счет эффекта РР в области нагрева зондирующие радиоволны могут захватываться в ионосферный волноводный канал (ИВК) и распространяться на достаточно большие глобальные расстояния с малым затуханием. В данной работе рассматривается бистатическая геометрия радиолокации для случая регистрации сигналов РР с помощью приемника на борту ИСЗ.

**Цель работы** – исследование возможности обнаружения области ионосферы, искусственно возмущенной мощным радиоизлучением, путём наблюдения сигналов ракурсного рассеяния радиоволн с помощью спутникового ионозонда.

### Методика расчета ракурсного рассеяния радиоволн на МИИН

Для расчета интенсивности ракурсного рассеяния будем пользоваться теорией Буккера [6], согласно которой в борновском приближении однократного рассеяния дифференциальное сечение рассеяния плоской волны  $E$  на некотором объеме  $V$ , содержащем случайные неоднородности с относительной интенсивностью флуктуации диэлектрической проницаемости  $(\Delta\varepsilon/\varepsilon)$ , записывается в виде

$$\sigma_B = \frac{32\pi^2 \sin^2 \chi}{\lambda^2} \int_V F \{l_1, m_1, n_1\} \{l_2, m_2, n_2\} dV \quad (1)$$

где  $\chi$  – угол между вектором  $E$  и направлением на точку наблюдения,

$\lambda$  – длина волны,

$k = 2\pi/\lambda$ ,

$F$  – спектральная плотность флуктуации диэлектрической проницаемости,

$\{l_1, m_1, n_1\}$  и  $\{l_2, m_2, n_2\}$  – направляющие косинусы векторов падающей  $k_0$  и рассеянной  $k'$  волн соответственно.

Анизотропия рассеяния определяется видом функции  $F$ , которая является преобразованием Фурье от функции корреляции неоднородностей. Для получения полного поперечника рассеяния  $\sigma_\Sigma$  необходимо проинтегрировать  $\sigma_B$  по всему объему ИОВ, в котором находятся МИИН.

Выберем систему координат, в которой задана ионосфера, так чтобы ось  $(OX)$  была направлена вдоль магнитного меридиана. Направление магнитного поля Земли  $H$  определяется углом  $\gamma$  с осью  $(OZ)$ . Пусть направление падающей волны  $k_0$  в системе координат  $(XYZ)$  задано углами:  $\alpha_0$  – вертикальный угол, отсчитываемый от плоскости  $XY$ , и  $\varphi_0$  – азимутальный угол, отсчитываемый от оси  $OX$ , тогда направляющие косинусы вектора  $k_0$  будут  $\{\cos \alpha_0 \cos \varphi_0, \cos \alpha_0 \sin \varphi_0, \sin \alpha_0\}$ . Для направления рассеянной волны  $k'$ , заданного вертикальным углом  $\beta(z)$  и азимутальным углом  $\varphi'$ , направляющие косинусы в системе координат  $(X, Y, Z)$  на высоте  $z$  будут  $\{\cos \beta \cos \varphi', \cos \beta \sin \varphi', \sin \beta\}$ . Задавая функцию корреляции неоднородностей, вытянутых вдоль магнитного поля Земли, в виде гауссоиды с продольным ( $L$ ) и поперечным ( $T$ ) радиусами корреляции получим для дифференциального сечения рассеяния выражение

$$\sigma_B = \frac{\pi^2 \sin^2 \chi}{(2\pi c)^4} \omega_0^4 \left(\frac{\Delta N}{N}\right)^2 T^2 L \exp\left[-\left(\frac{kL}{2}\right)^2 \Psi(z)\right], \quad (2)$$

где угловая функция рассеяния  $\Psi$  задается формулой:

$$\begin{aligned} \Psi(z) = & q^2 [(\cos \alpha \cos \varphi - \cos \beta \cos \varphi') \cos \gamma + (\sin \alpha \sin \beta) \sin \gamma]^2 + \\ & + q^2 (\cos \alpha \sin \varphi - \cos \beta \sin \varphi')^2 + [(\cos \beta \cos \varphi' - \cos \alpha \cos \varphi) \sin \gamma + \\ & + (\sin \alpha - \sin \beta) \cos \gamma]^2, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $q = T/L$  – коэффициент вытянутости магнитно-ориентированных неоднородностей.

Задачей моделирования эффектов РР являлся расчет величины  $\sigma_B$  и нахождение зон приема рассеянных радиоволн на высотах орбиты ИСЗ. Для получения полного поперечника рассеяния  $\sigma_\Sigma$  необходимо проинтегрировать  $\sigma_B$  по всему объему ОВ, в котором находятся МИИН. Так, например, если  $D$  – диаметр области нагрева, а  $B$  – вертикальный размер ИОВ, то поперечное сечение можно оценить по простой формуле

$$\sigma_{\Sigma} = \frac{1}{4} \sigma_B \pi B D^2 \quad (4)$$

При распространении волны в неоднородной ионосфере направление вектора  $\mathbf{k}_0$  вследствие рефракции меняется и, соответственно, углы  $\alpha_0$  и  $\varphi_0$  являются функциями координат  $x, y, z$ . Для расчета  $\alpha_0(x, y, z)$  и  $\varphi_0(x, y, z)$  вдоль траектории радиолуча будем использовать геометро-оптическое приближение, при котором для расчета траектории радиолуча используется метод характеристик [7]. Тогда задача расчета траекторий луча сводится к решению системы дифференциальных уравнений вида

$$\frac{dx}{dt} = \left[ 2c^2 k - \frac{\partial(\omega^2 n_{1,2}^2)}{\partial k} \right] / \frac{\partial(\omega^2 n_{1,2}^2)}{\partial \omega}, \quad (5)$$

$$\frac{dk}{dt} = \frac{\partial(\omega^2 n_{1,2}^2)}{\partial x} / \frac{\partial(\omega^2 n_{1,2}^2)}{\partial \omega}, \quad (6)$$

где  $c$  - скорость света,

$\mathbf{x}(t)$  – траектория луча,

$n_{1,2} = \sqrt{\varepsilon(\omega_0, \omega)}$  – показатель преломления волны в ионосферной плазме (индексы 1,

2 указывают на поляризацию волны в магнитоактивной плазме),

$\varepsilon(\omega_0, \omega)$  - диэлектрическая проницаемость плазмы,

$\omega_0$  – плазменная частота,

$\omega$  – циклическая частота радиоволны,

$t$  – параметр вдоль луча.

Величина  $\varepsilon(\omega_0, \omega)$  включает зависимость от пространственных координат через плазменную частоту  $\omega_0$ , которая, в свою очередь, является трехмерной функцией электронной концентрации в неоднородной ионосфере. Кроме того,  $\varepsilon(\omega_0, \omega)$  зависит от угла  $\gamma$  между вектором магнитного поля Земли и вектором  $\mathbf{k}_0$  зондирующей волны. Поэтому правые части уравнений (5) и (6) имеют весьма громоздкий вид и здесь не приводятся. Для численного решения системы уравнений (5) и (6) использовался метод Рунге-Кутты-Мерсона с автоматической коррекцией точности. При этом постановка задачи Коши сводилась к заданию начальных координат траектории луча ( $x_0, y_0, z_0$ ) и компонент вектора  $\mathbf{k}_0$  при  $t=0$ .

Алгоритм расчета зон приема РР состоял в том, что с помощью специальных процедур поиска начальных углов излучения  $\alpha_0$  и  $\varphi_0$  находилась такая траектория, которая проходила через центр области возмущения. Если излучающая система находится на фиксированной дальности  $d$  от области искусственного возмущения, то существует определенный интервал вертикальных углов ( $\alpha_{01}, \alpha_{02}$ ), при которых лучи попадают в возмущенную область, центр которой находится на некоторой высоте  $z_H$ . На этой высоте при фиксированных углах  $\alpha_0(z_H)$  и  $\varphi_0(z_H)$  проводится расчет величины  $\sigma_B$ , при этом проводится дискретное сканирование углов рассеяния  $\beta$  и  $\varphi'$ . В ходе такого сканирования проводится поиск углов  $\beta$  и  $\varphi'$  для которых величина  $\sigma_B$  превышает некоторое минимальное пороговое значение  $\sigma_m$ . Для каждой пары углов  $\beta$  и  $\varphi'$  проводился расчет траектории луча, приходящего на заданную высоту орбиты спутника  $z_c$ .

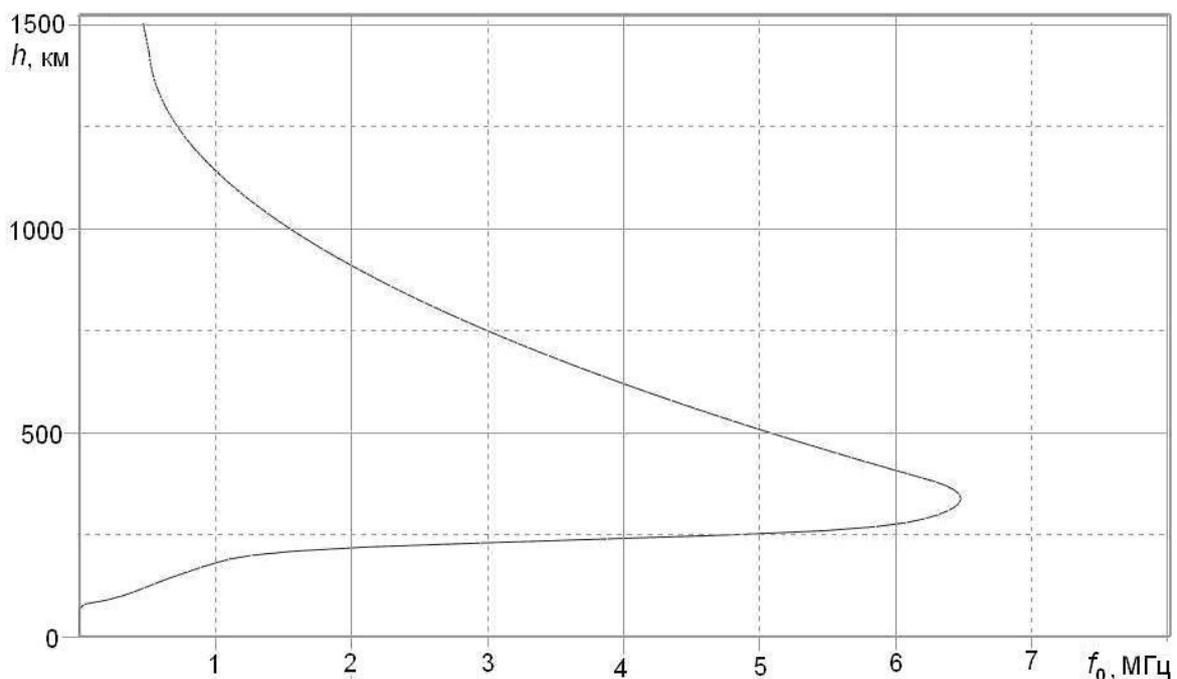
В условиях реальных экспериментов, когда передатчик и приемник расположены достаточно далеко от области искусственного возмущения, углы  $\alpha(z)$  и  $\beta(z)$  будут малы, поэтому при вертикальной поляризации падающей волны в (2) можно для простоты положить  $\sin(\chi) \sim 1$ .

## Численное моделирование бистатической радиолокации МИИН на орбите ИСЗ

Рассмотрим в качестве практического примера нагрев ионосферы на среднеширотном стенде “Сура”, предполагая, что центр ОВ находится на высоте  $z_H \sim 200 - 250$  км, диаметр области возмущения  $\sim 100$  км. Угол магнитного поля с вертикалью полагался равным  $\gamma = 19^\circ$ . Вычисление  $\sigma_B$  проводилось по формуле (2) при фиксированных значениях  $z_H$ ,  $D$ ,  $B$  и величине флуктуаций  $\delta Ne = 0,05$  при  $L = 0,5$  км, а величина  $q$  полагалась равной  $0,02$ .

Расчет  $\sigma_B$  проводился вдоль траектории луча, проходившего через область возмущения, при этом углы  $\alpha$  и  $\varphi$  на траектории определялись текущим волновым вектором  $k$ . Модель ионосферы задавалась на основе ионосферного профиля, полученного из инверсии типичной дневной ионограммы, при этом внешняя ионосфера задавалась экспоненциальной моделью профиля плазменной частоты, рис. 1.

Положим, что передатчик пробных волн находится на расстоянии  $1000$  км и излучает радиоволны в направлении на область искусственного возмущения над стендом “Сура”. Для попадания радиолуча на частоте  $15$  МГц в область искусственного возмущения азимут излучения был равен  $90^\circ$  (на восток), а вертикальные углы излучения находились вблизи значения  $\sim 10^\circ$ .



**Рис.1. Модель высотного профиля плазменной частоты  $f_0(h)$  для типичной среднеширотной дневной ионосферы.**

На рис.2. показана картина траекторий распространения зондирующих радиоволн на частоте  $15$  МГц, видно, что в область нагрева приходит семейство траекторий зондирующей радиоволны, которые образуют каустику – область фокусировки. Такая фокусировка значительно (на  $15 - 20$  Дб) может повышать энергетический потенциал бистатической радиолокации.

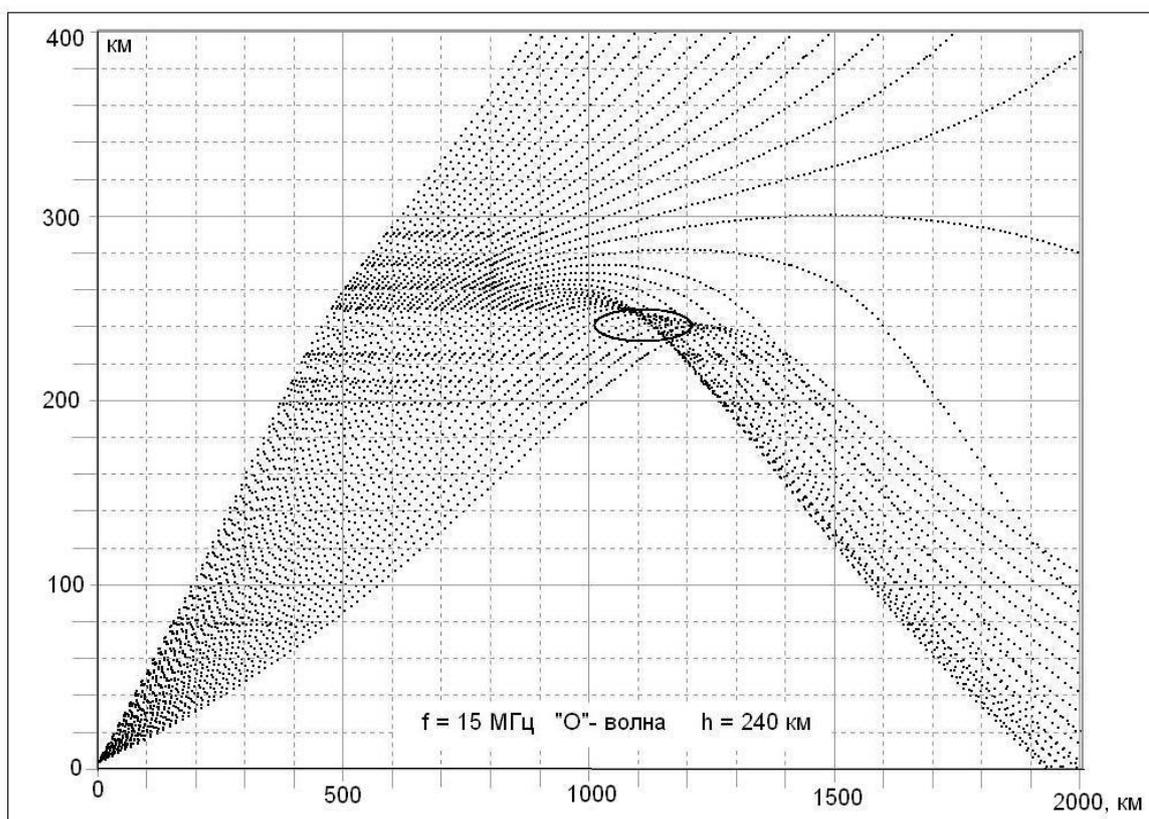
В области нагрева пробная волна испытывает рассеяние на МИИН и энергия рассеянных волн распространяется по ракурсным направлениям, при этом отраженная основная волна создает зоны прихода РР на поверхности Земли. А лучи на восходящих

участках траектории ракурсно рассеиваются в направлении вверх и создают зоны прихода сигналов РР на высотах пролета ИСЗ.

Для определения оптимальных зон наблюдения ракурсного рассеяния удобно вычислять безразмерную величину - коэффициент рассеяния  $Q(k_0, k')$ , который можно определить как долю энергии рассеянного поля, приходящего в точку наблюдения из френелевского объема:

$$Q(k_0, k') = R_\phi(\Delta P) \sigma_V, \quad (7)$$

где  $R_\phi(\Delta P)$  - радиус френелевского объема на расстоянии группового пути  $\Delta P$  от рассеивающего объема до точки наблюдения и определяется формулой  $R_\phi(\Delta P) = \sqrt{\lambda \Delta P}$ . Здесь  $k_0$  и  $k'$  - волновые векторы падающей и рассеянной радиоволн соответственно, а величина  $\Delta P$  вычисляется при расчете траектории луча, попадающего в точку наблюдения. Для получения полного сечения рассеяния от всей области необходимо проинтегрировать  $Q(k_0, k')$  по площади, занимаемой возмущенной областью в горизонтальной плоскости.

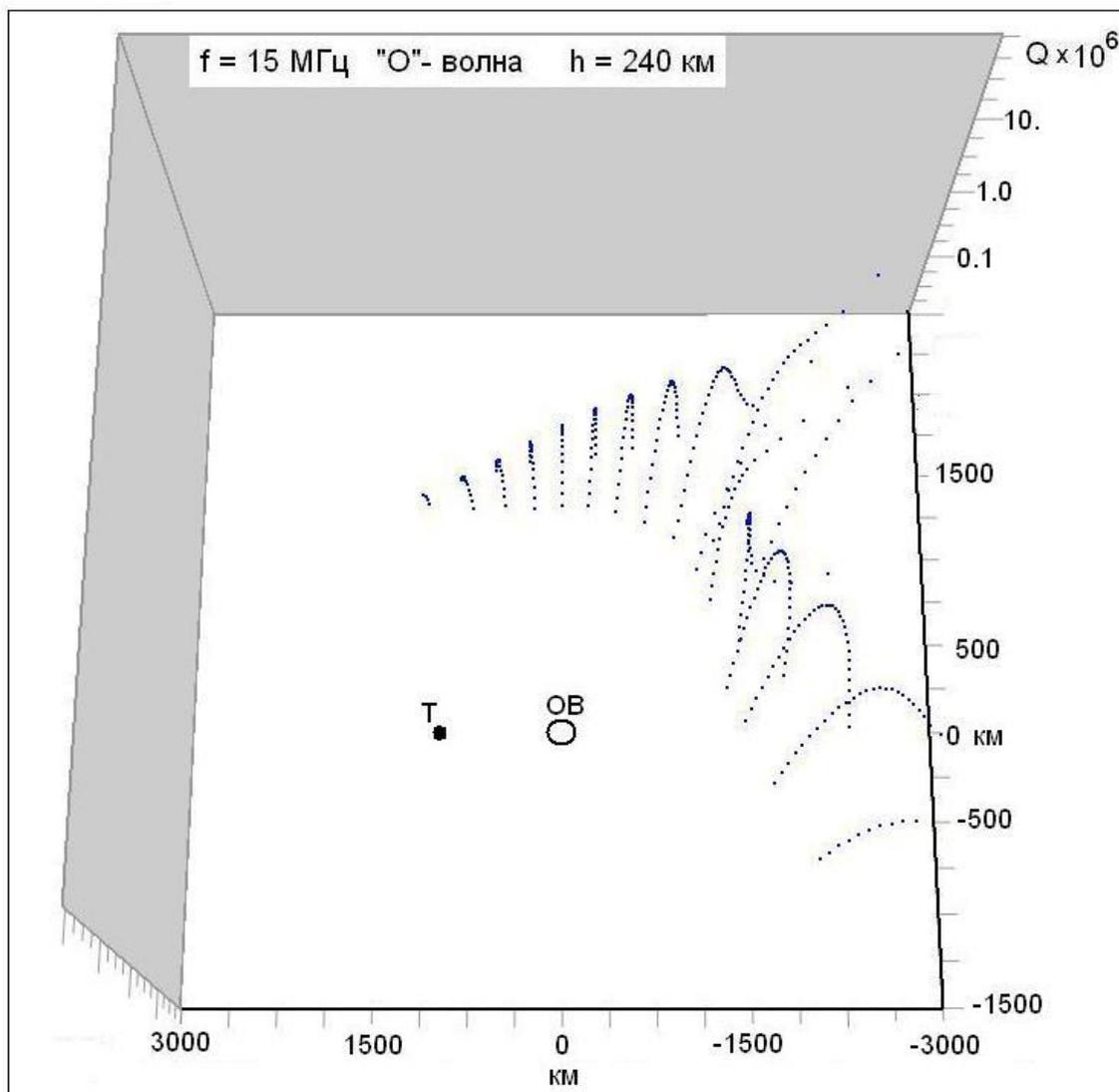


**Рис.2. Траектории лучей зондирующего передатчика, в область нагрева (эллипс) попадает каустика отраженных лучей.**

На рис.3. показаны результаты модельных расчетов  $Q(k_0, k')$  на частоте 15 МГц для зон приема сигналов РР на высоте 800 км в предположении, что вертикальный нагрев ионосферы проводится над станцией «Сура» и область возмущения (ОВ) находится на высоте 240 км. Рассмотрен случай, при котором передатчик Т расположен в 1000 км к западу от ОВ и зондирующий луч приходит в ОВ в азимуте  $90^\circ$  под вертикальным углом  $\sim 10^\circ$ . Видно, что на заданной высоте 800 км сигналы РР можно обнаруживать в обширной зоне (где величина  $Q(k_0, k') > 10^{-8}$ ), при этом ширина зоны изменяется в

зависимости от азимута рассеяния от  $\sim 100$  км до  $\sim 500$  км. Эту оценку ширины зоны РР следует увеличить на  $\sim 100$  км для учета горизонтального размера ИОВ над нагревным стендом.

Если орбита ИСЗ, на борту которого проводится регистрация сигналов РР, будет проходить в направлении на восток от места с координатами  $0Y = \sim 1700$  км и  $0X \sim 1500$  км до места с координатами  $0X \sim 1500$  км и  $0Y = \sim -700$  км, то сигналы РР могут наблюдаться на участке орбиты длиной  $\sim 2400$  км и время регистрации может составить почти  $\sim 200$  сек.



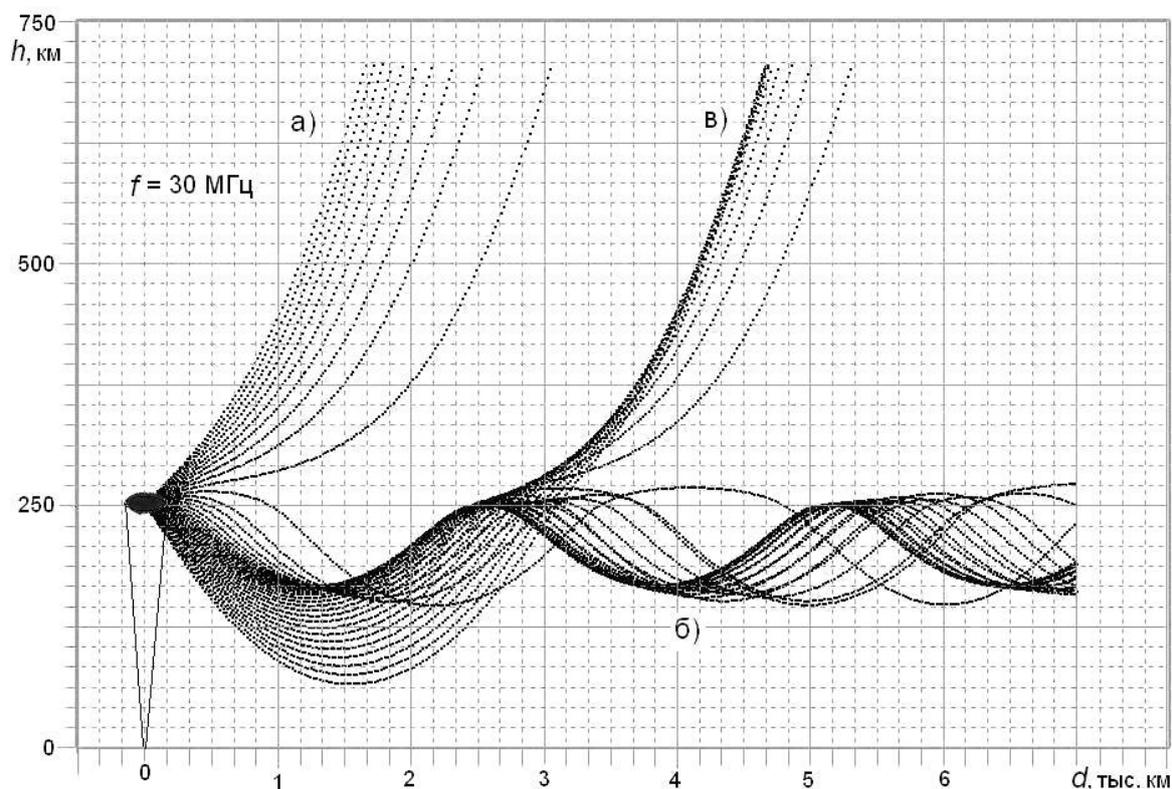
**Рис.3. Зоны приема сигналов РР на высоте орбиты ИСЗ 800 км, частота зондирующей волны 15 МГц, высота ОВ 240 км.**

В другой ситуации, если орбита ИСЗ будет почти полярной, то при пролете ИСЗ с юга на север от места с координатой  $0X \sim -500$  км и  $0Y = \sim -2000$  км до места с координатой  $0X \sim 1600$  км и  $0Y = \sim -750$  км, длина трассы регистрации сигналов РР может составить величину  $\sim 2100$  км и время наблюдения составит  $\sim 3$  минуты.

В [5] было показано, что РР сигналы могут захватываться в ионосферный волноводный канал (ИВК) и распространяться на достаточно большие глобальные расстояния с малым затуханием. При этом ввиду горизонтальной неоднородности ионосферы РР сигналы могут выходить из ИВК и распространяться вверх на высоты, на которых могут находиться орбиты ИСЗ и где РР сигналы могут наблюдаться. Для

моделирования такой ситуации были проведены расчеты с вертикальным профилем на рис.1 и заданием горизонтальной неоднородности ионосферы с понижением электронной концентрации в направлении с запада на восток, что соответствует вечернему времени суток в окрестности ОВ.

На рис.4 показана картина траекторий радиоволн, ракурсно рассеянных от области нагрева на высоте 250 км. Считалось, что зондирующие радиоволны на частоте 30 МГц попадали в область нагрева под вертикальным углом возвышения  $10^\circ$  в азимуте  $90^\circ$  в направлении с запада на восток. Ракурсно рассеянные волны с коэффициентом  $Q(k_0, k')$   $> 10^{-8}$  имели направление захвата в ИВК вблизи азимутов от  $110^\circ$  до  $150^\circ$ , т.е. на юго-восток. Здесь траектории рассеянных волн показаны в проекции на плоскость  $ZOY$ , проходящей в азимуте  $140^\circ$ , при этом сферически-слоистая геометрия ионосферы для простоты приведена к прямоугольной системе координат.



**Рис.4. Захват РР радиоволн с  $f = 30$  МГц в ИВК и выход радиоволн из ИВК. Эллипс с заливкой - область искусственного возмущения.**

На рис.4 видно также, что наряду с ближней зоной рассеяния а), которая аналогична показанной на рис.3, существуют захваченные в приподнятый ионосферный волновой канал траектории б). Видно также, что из-за горизонтальной неоднородности ионосферы возникают траектории в), выходящие из ИВК вверх вследствие уменьшения сечения ИВК. Видно, что выходящие из ИВК на дальности около 2600 км могут достигать высоты орбит ИСЗ на высоте 700 км и на расстоянии более 4500 км от области нагрева.

### **Заключение**

Возбуждение МИИН является одним из главных свидетельств искусственного воздействия мощных ВЧ радиоволн на ионосферу Земли. Одним из наиболее важных методов инструментального наблюдения МИИН является метод регистрации сигналов

ракурсного рассеяния радиоволн ВЧ и УВЧ диапазонов. Разработанные численные методы и алгоритмы позволяют промоделировать и рассчитать различные конфигурации постановки экспериментального наблюдения сигналов РР на борту ИСЗ.

Результаты численного моделирования распространения радиоволн при бистатической радиолокации показали возможность наблюдения сигналов РР на высотах орбит ИСЗ на расстояниях до 1000 км от области возмущения. Показано также, что при бистатической радиолокации за счет захвата радиоволн в ионосферный волновой канал возможен прием сигналов РР на значительных (более 4000 км) расстояниях от ОВ. При этом ширина зон приема сигналов РР может составлять величину до ~ 1000 км и это позволяет обнаруживать и регистрировать сигнал РР по времени в течение ~ 200 сек. В качестве регистратора сигналов РР на высотах полета ИСЗ вполне может использоваться радиоприемное устройство бортового ионозонда ИСЗ. При этом в качестве зондирующих радиоволн можно использовать излучение наземных вещательных КВ передатчиков.

### **Литература**

1. Атлот (Utlaut W.F.) / Изменение ионосферы под воздействием излучения мощных КВ передатчиков. Расширение возможностей радиосвязи в диапазонах метровых и дециметровых волн, а также исследований в области физики плазмы // ТИИЭР. 1975. Т. 63. № 7. С. 35 – 60.
2. Thome G.D, BloodD.W. / First observations of RF backscattering from field-aligned irregularities produced by ionospheric heating. // Radio Sci. 1974. V. 9. No 11. P. 917 – 921.
3. Minkoff J., Laviola M., Abrams S. and Porter D. / Radio frequency scattering from a heated ionospheric volume, 2, Bistatic measurements // Radio Sci. 1974. V. 9. No 11. P. 957 – 963.
4. Гуревич А.В. / Нелинейные эффекты в ионосфере // УФН. 2007. Том.111. № 11. С.1145 – 1177.
5. Гуревич А.В., Ким В.Ю. / Влияние рассеяния на магнитно-ориентированных неоднородностях ионосферы на захват радиоволн в ионосферный волновой канал // В кн. Распространение декаметровых радиоволн. М.: Наука. ИЗМИРАН. 1976. С. 5 – 23.
6. Booker Y.G. A theory of scattering by non-isotropic irregularities with application to radar reflections from the aurora // J. Atmos. Terr. Phys. 1956. V. 8. No 3. P. 204 – 221
7. Лукин Д.С., Спиридонов Ю.Г. / Применение метода характеристик для решения на ЭВМ задач распространения электромагнитных волн в неоднородных анизотропных средах // В кн. Лучевое приближение и вопросы распространения радиоволн. Наука. М. 1971. С. 265 – 279.