

## РАДИОЗОНДИРОВАНИЕ ИСКУССТВЕННО ВОЗМУЩЁННОЙ МОЩНЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ КРУПНОМАСШТАБНОЙ ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ

*И. В. Крашенинников*

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН)

Представлены результаты исследований по многочастотному наклонному радиозондированию крупномасштабного возмущения электронной плотности области F2 ионосферы, возникающего в области отражения (верхнего гибридного резонанса) вертикально падающей мощной радиоволны на ионосферу. На основе феноменологического анализа данных наклонного радиозондирования с линейной частотной модуляцией ионосферы в экспериментах 2007 г. обсуждается гипотеза об эффекте захвата в искусственный ионосферный резонатор и высвечивания зондирующего излучения в ближнюю зону нагревного стенда СУРА.

*Ключевые слова:* ионозонд, ионограмма наклонного радиозондирования ионосферы, ракурсное рассеяние, МПЧ, искусственно возмущённая область ионосферы.

### ВВЕДЕНИЕ

Нелинейное взаимодействие мощных радиоволн с ионосферной плазмой при вертикальном излучении носит резонансный характер и приводит к искусственному возмущению ионосферы, сопровождающемуся стимулированным развитием неоднородностей электронной плотности различных масштабов, вплоть до размеров, определяемых угловой шириной диаграммы направленности [Гуревич, 2007; Фролов и др., 2007]. Такие неоднородности в определённых геофизических условиях могут оказывать существенное влияние на характеристики радиосигналов, проходящих через возмущённую область (ВО) ионосферы. Основные радиофизические проявления влияния искусственно возмущённой области на зондирующие радиоволны сводятся к двум эффектам: рассеянию на мелкомасштабных неоднородностях и дополнительной рефракции на крупномасштабной структуре возмущения, которая может иметь, в зависимости от высоты локализации, пониженную или повышенную относительно фонового значения величину электронной плотности.

В данной работе представлены результаты исследований радиофизического проявления искусственно возмущённой области ионосферы, создаваемой нагревным стендом СУРА, проводившихся в ИЗМИРАН с 1980-х гг. В частности, анализируются два эффекта: изменение регулярного значения МПЧ (максимально применимая частота) 1F2-ионограмм наклонного радиозондирования ионосферы и захват зондирующего излучения в искусственный ионосферный резонатор.

### 1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В настоящее время сложилось общепринятое понимание, что под действием мощного радиоизлучения в верхней ионосфере может образоваться крупномасштабная область с пониженной относительно фонового содержания электронной плотностью [Фролов и др., 2007], заполненная мелко-масштабными, вытянутыми по геомагнитному полю, возмущениями (турбулентностью) [Гуревич, 2007]. Следствием мелко-масштабной структуры возмущённой области будет рассеяние проходящих радиоволн, резонансное как по длине волны, так и по пространственной локализации — ракурсное рассеяние [Гуревич, 2007]. Для ракурсного рассеяния характерно формирование конуса проявления — для точек излучения и приёма должен выполняться критерий близости или дополнительности углов, образуемых волновыми векторами и вектором геомагнитного поля в центре возмущённой области. Следы ракурсного рассеяния на ионограммах наклонного радиозондирования ионосферы могут иметь кластерную структуру, т.е. в частотной области могут существовать несколько отдельных групп, различающихся как интенсивностью, так и областью существования. Физической причиной является сложный характер взаимодействия процессов рассеяния на неоднородностях возмущённой области и рефракции зондирующих волн в фоновой неоднородной ионосфере [Урядов и др., 2009].

Крупный масштаб возмущённой области сопоставим с сечением диаграммы направленности антенны нагревного стенда и составляет ~100 км для высот отражения слоя F2 ионосферы [Фролов и др., 2007], что значительно больше длин волн зондирующих сигналов и может приводить к их дополнительной рефракции. В частности, при многочастотном наклонном радиозондировании ионосферы в диапазоне декаметровых волн это влияние может быть причиной изменения наиболее чувствительного параметра ионограммы наклонного радиозондирования (НЗ) — максимально применимой частоты, характеризующего точку смыкания ветвей нижних и верхних лучей моды, характерной для локализации возмущённой области.

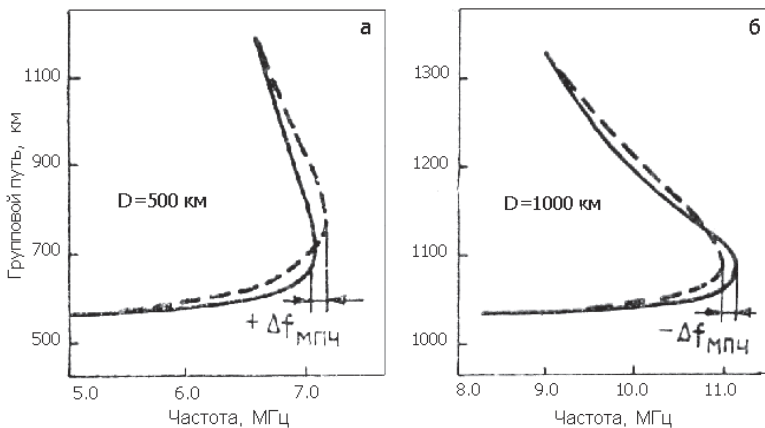
С учётом основных процессов взаимодействия мощного волнового поля с ионосферной плазмой, локализованное возмущение для высот 100...400 км определяется многофакторным процессом, в котором участвуют: температура ионов, температура, гирочастота и эффективная частота соударений электронов, эффективная мощность излучателя (с учётом коэффициента усиления антенной системы). Вертикальный размер возмущённой области определяется текущими геофизическими условиями и высотой отражения нагревной волны, а горизонтальный — диаграммой направленности антенны с учётом фактора нелинейности. Так, для высот слоя F2 изменение электронной плотности будет отрицательным и величина относительного возмущения растёт с высотой [Бахметьева и др., 1985].

Для упрощённого случая двумерно-неоднородной изотропной среды, обладающего большей наглядностью механизмов рефракции луча, система лучевых уравнений может быть представлена в виде, удобном для физического понимания [Тинин, 1982]:

$$\frac{dr}{d\theta} = r \operatorname{tg} \beta, \quad \frac{d\beta}{d\theta} = -\frac{1}{2\mu^2} \left[ \operatorname{tg} \beta \frac{\partial \mu^2}{\partial \theta} - r \frac{\partial \mu^2}{\partial r} \right] + 1, \quad (1)$$

где  $\theta$  — угловое расстояние по дуге большого круга;  $\beta$  — текущее значение угла возвышения по лучевой траектории;  $\mu(\mathbf{r})$  — вещественная часть показателя преломления. В частности, из уравнений легко видеть, что траектория луча определяется не только показателем преломления, зависящим от плазменной частоты, но и градиентами показателя преломления (в частности, градиентами электронной плотности). Наибольшее влияние возмущённой области проявляется при её локализации на высотах отражения зондирующих волн, т. е. в окрестности средней точки радиотрассы наклонного зондирования. На рис. 1 приведены два примера проявления крупномасштабного возмущения с пониженной электронной плотностью ( $\Delta f_{N_{\max}}^2 / f_{N_0}^2 \approx 15\%$ ) на дальностях радиозондирования в 500 и 1000 км, иллюстрирующих возможность формирования, как повышения, так и понижения МПЧ 1F2 [Бочкарев и др., 1987].

Сплошной линией представлена зависимость группового пути волны от частоты зондирования для невозмущённой ионосферы, а пунктирной — при наличии возмущения, локализованного в средней точке радиотрасс. Видно, что максимальные изменения группового запаздывания проявляются в области рабочих частот вблизи МПЧ-трассы зондирования, а их величина существенным образом зависит от дальности: на коротких трассах (см. рис. 1а) возмущение ионограммы НЗ проявляется более значительно. В данных примерах видно, что особая точка ионограммы НЗ — точка возврата функции группового пути  $P'(f)$  (МПЧ), по-видимому, наиболее чувствительна к наличию возмущения на трассе, расположенного в области отражения частоты  $f = f_{\text{МПЧ}}$  и наиболее удобна с точки зрения анализа данных экспериментальных исследований.



**Рис. 1.** Изменение МПЧ 1F2 в ионограммах многочастотного наклонного радиозондирования возмущённой области ионосферы с пониженным, относительно фонового, содержанием электронов, образующейся при воздействии мощной, вертикально падающей, радиоволны на ионосферу

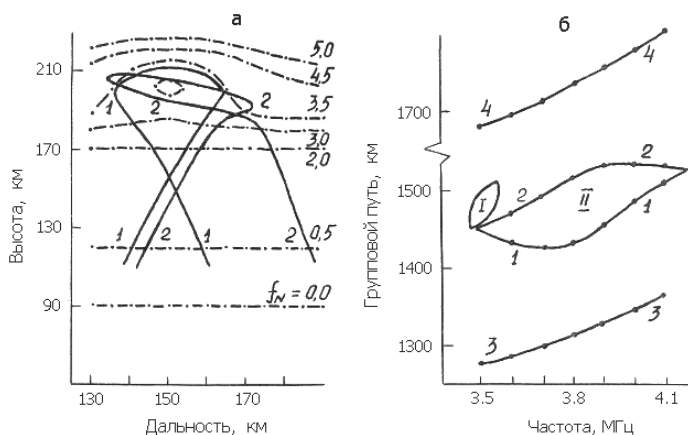


Рис. 2. Лучевые траектории (а) и структура межслоевой области ионограммы НЗ (б) при сильном отрицательном локальном возмущении верхней ионосферы

Другим интересным эффектом при многочастотном радиозондировании крупномасштабной возмущённой области ионосферы с пониженным значением электронной концентрации является возможный захват зондирующих волн в полость (имеется некоторая аналогия с низкодобротным резонатором) с последующим приходом в точку приёма [Крашенинников, Лянной, 1987]. При этом под возмущённой областью на поверхности Земли формируется освещённая зона, т.е. как бы имеет место прожекторный эффект. В таком резонаторе (рис. 2а) лучевая траектория проходит в условиях пониженных значений показателя преломления и, следовательно, сигнал будет иметь повышенный набег группового запаздывания. В эксперименте, как предполагается, при учёте ещё и тонкой структуры нагревного возмущения в виде мелкомасштабных неоднородностей, следы резонаторных мод выглядели бы как диффузное облако с частотной зависимостью. Частотный интервал существования небольшой (рис. 2б) и напрямую зависит от степени возмущения  $\Delta N_e/N_e$ , которая, в свою очередь, определяется излучаемой мощностью, уровнем отражения нагревной волны и условиями потерь энергии при распространении до точки отражения. Сам эффект носит пороговый характер, т.е. необходимо наличие достаточно значимого градиента показателя преломления на границе возмущённой области, что напрямую связано с полем волны накачки. Так, для реализации эффекта на рис. 2 степень возмущения электронной концентрации в центре ВО составляет  $\Delta f_{N_{\max}}^2 / f_{N_0}^2 \approx 40\%$  с гауссовым пространственным распределением. С приближением частоты нагрева к критической частоте F2-слоя ионосферы частотный интервал следов резонаторных мод будет смещаться к МПЧ базовых мод. Смещение в сторону МПЧ будет наблюдаться и при горизонтальном смещении ВО от области средней точки. Для регистрации эффекта также необходим и высокий потенциал зондирующих сигналов, поскольку захват осуществляется в довольно узком секторе углов излучения и имеет место высокая расходимость волнового поля. Следует отметить, что формирование резонаторных мод происходит на гео-

метрооптической основе и, следовательно, их следы должны бы иметь большую энергетику, чем следы ракурсного рассеяния на магнитоориентированных вытянутых мелкомасштабных неоднородностях.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В октябре 1982 г были проведены специальные исследования с целью выявления эффекта изменения МПЧ за счёт воздействия крупномасштабного возмущения верхней ионосферы на радиотрассе ИЗМИРАН-Янаул (Башкирия) (~1100 км), для которой нагревный стенда СУРА располагался в области средней точки [Бахметьева и др., 1985; Бочкарев и др., 1987]. На конечных пунктах радиотрассы синхронно работали в режиме НЗ классические импульсные ионозонды: стационарный ионозонд вертикального радиозондирования (ВЗ) с большой мощностью излучения (~30 кВт в импульсе) «Сойка» (ИЗМИРАН) и передвижной ионозонд «Базис» (Янаул), имеющие достаточно высокое временное и частотное разрешение. Кроме такого стандартного вида зондирования в отдельных сеансах использовался специальный режим, для регистрации возможных обратных отражений — рассеяния на мелкомасштабных неоднородностях электронной плотности.

Регистрация ионограмм НЗ осуществлялась на обоих концах радиотрассы как в период воздействия, так и в отсутствие мощного нагревного радиоизлучения с тактом в 1 мин, что позволило получить, как при нагреве, так и в паузе по 10 реализаций. В период работы нагревного стенда ( $P_G \approx 50$  МВт, О-компонента) на ионограммах НЗ было зарегистрировано локальное увеличение МПЧ исследуемой трассы регулярного вида в вечернее время, на фоне естественного её снижения (фрагмент приведён на рис. 3). Здесь 1 — данные по ионозонду «Сойка»; 2 — по станции «Базис»; 3 — рассчитанные при  $\Delta N_e/N_{e0} = 0$ ; 4 —  $\Delta N_e/N_{e0} = 0,1$ . Видно, что уже 10%-е крупномасштабное уменьшение электронной концентрации на высоте отражения нагревной волны способно в подходящих условиях привести к заметному увеличению МПЧ.

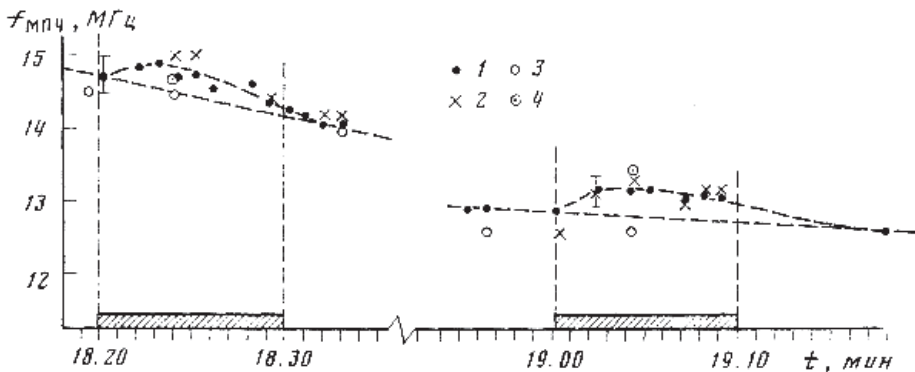
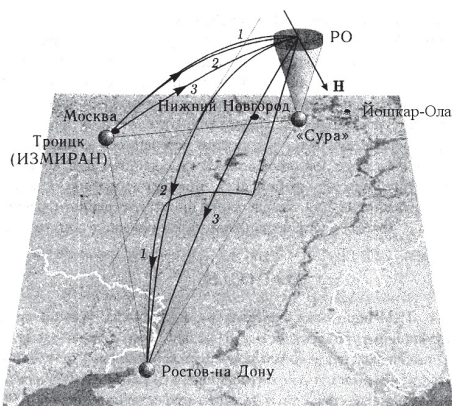


Рис. 3. Динамика суточного хода и локальное увеличение МПЧ в период воздействия мощной радиоволны на ионосферную плазму: эксперимент и моделирование



**Рис. 4.** Схема эксперимента августа 2007 г. по ЛЧМ-радиозондированию искусственно возмущённой области ионосферы. Схематично представлены возможные пути освещения ВО и приёма рассеянного сигнала в пункте Ростова-на-Дону

Изменение в высотном распределении электронной концентрации вследствие нагревного действия мощной волны, полученное в решении обратной задачи НЗ по экспериментальным данным, представлено в статье [Бочкарев и др., 1987]. Показано, что в эффективном высотном профиле электронной плотности наблюдается локализованное понижение, что в последующем было подтверждено, в частности, томографическими измерениями [Фролов и др., 2007].

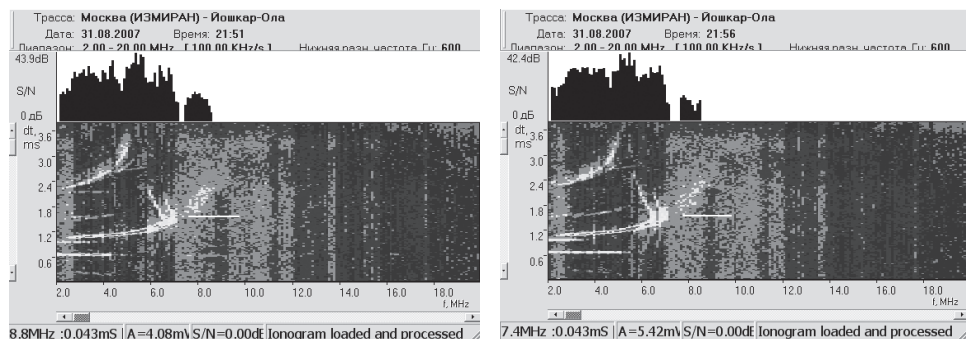
В данном эксперименте следует также отметить, по-видимому, первое упоминание о наблюдении сигналов обратного (ракурсного) рассеяния мощного импульсного передатчика станции «Сойка» (~30 кВт в импульсе) [Бахметьева и др., 1985], обусловленных другой физической компонентой структуры нагревной области — мелкомасштабными магнитоориентированными неоднородностями электронной концентрации.

В 2007 г. (25–31 августа 2007 г.) был поставлен первый из серии в своём роде уникальных экспериментов по исследованию свойств ракурсного рассеяния на искусственных мелкомасштабных магнитоориентированных неоднородностях плазмы, схема которого представлена на рис. 4 [Урядов и др., 2009]. В дальнейшем подобные экспериментальные исследования, с добавлением возможностей приёмных установок, были повторены ещё в 2008–2010 гг. [Урядов и др., 2009, Вертоградов и др., 2012]. В основе данных исследований лежит применение принципа радара с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) бистатической конфигурации к зондированию искусственно возмущённой области с элементами томографии. Излучение ЛЧМ-сигнала производилось из ИЗМИРАН передатчиком «Мицар» с непрерывной мощностью излучения ~400 Вт и главный лепесток передающей антенны в азимутальной плоскости был направлен в восточном направлении. Приём зондирующих сигналов осуществлялся в двух пунктах: Ростове-на-Дону и Йошкар-Оле (дальняя и ближняя зона области нагрева). Как можно видеть на рис. 4 условия регистрации ракурсного рассеяния хорошо соответствовали Ростову-на-Дону и практически их невозможно было выполнить для Йошкар-Олы, вследствие направления геомагнитного

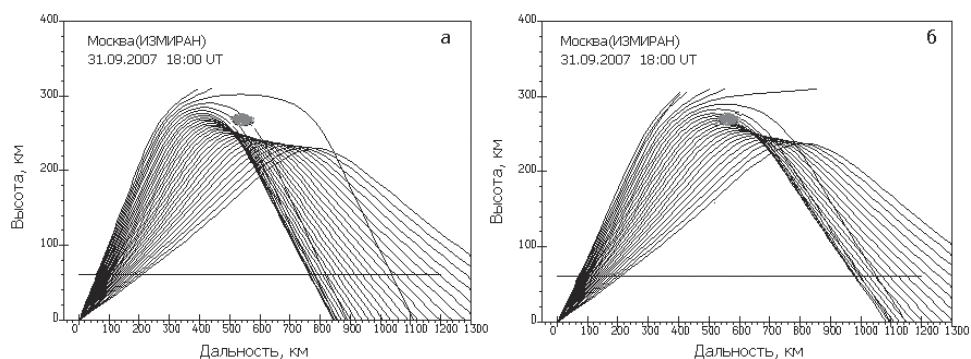
поля. Нагрев осуществлялся обыкновенной волной с эквивалентной мощностью  $\sim 80$  МВт. Для сравнения эффективности возбуждения искусственной ионосферной турбулентности при различных углах падения мощного радиоизлучения на ионосферу наклон главного лепестка диаграммы направленности антенны стенда варьировался в пределах от  $8$  до  $24^\circ$  к югу от географического зенита.

В целом, в серии экспериментов 2007–2010 гг. было показано устойчивое формирование анизотропного ракурсного рассеяния, что проявлялось в стабильной регистрации сигналов ракурсного рассеяния в дальней зоне (Ростов-на-Дону) и практически полным их отсутствием в пунктах ближней зоны (Йошкар-Ола и Нижний Новгород) [Урядов и др., 2009]. Исключительным случаем является регистрация следов зондирующих сигналов в Йошкар-Оле 31.08.2007 г. в интервале 21:00–22:00 (рис. 5), явно обусловленных работой нагревного стенда, в форме диффузного облака в достаточно узкой полосе, имеющего ярко выраженную частотную зависимость группового запаздывания и обладающего большей энергетикой, чем характерный уровень для следов ракурсного рассеяния. При этом имеет место некоторый частотный разрыв между основным, базовым следом моды 1F2 и дополнительным. В паузе работы нагревного стенда дополнительный след хотя и ослабевает, но не исчезает полностью. Так, на рис. 5 (правая панель) отмечается его наличие через 2 мин после выключения нагрева, хотя максимальное время релаксации процесса ракурсного рассеяния не превышает 50 с [Hysell et al., 1996].

На рис. 6, иллюстрирующего геометрию ВО на основе модельных расчётов, видно, что её прямое освещение передатчиком из ИЗМИРАН начинается с частоты  $\sim 7,8$  МГц, когда радиоизлучение, в форме О-компоненты, начинает проходить сквозь ионосферу до области локализации искусственного возмущения, т. е. формирование «нелинейной» моды начинается сразу после прямого прохождения радиоизлучения до возмущённой области. При этом частотная зависимость следа качественно соответствует структуре диффузной области ионограммы НЗ, при наличии искусственного резонатора (см. рис. 2), а более высокая энергетика соответствует геометрооптическому механизму захвата зондирующего излучения.



**Рис. 5.** Ионограммы наклонного радиозондирования ионосферы (31.08.2007 г.) со следами проявления искусственного ионосферного возмущения в Йошкар-Оле: при работе и в паузе нагревного передатчика



**Рис. 6.** Облучение возмущённой области на частотах 7,0 МГц (а) и 8,0 МГц (б) 31 августа 2007 г. 18:00 UT из пункта Москва (ИЗМИРАН) для обыкновенной компоненты

Общая совокупность результатов феноменологического анализа: высокая энергетика следа, аномальное запаздывание и временной масштаб релаксации позволяет утверждать, что дополнительный след на ионограмме НЗ (см. рис. 2), по-видимому, обусловлен эффектом захвата зондирующей волны в искусственный ионосферный резонатор и последующим высвечиванием в ближнюю область (см. рис. 2). Проявлению данного эффекта также способствовало направление нагревного излучения О-поляризации в область магнитного зенита — эффект магнитного зенита [Нопару et al., 2011], специфические текущие ионосферные условия и, как следствие, несколько большая, чем обычно, высота формирования возмущённой области.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, многолетние исследования по диагностике области нелинейного взаимодействия мощного вертикального радиоизлучения с ионосферной плазмой на основе метода наклонного радиозондирования ионосферы позволили экспериментально показать существование крупномасштабной области с пониженным уровнем электронной плотности в слое F2 ионосферы и проанализировать радиофизические аспекты её проявления.

### ЛИТЕРАТУРА

- [Бахметьева и др., 1985] *Бахметьева Н. В., Бенедиктов Е. А., Бочкарев Г. С.* и др. Изменение дистанционно-частотных характеристик наклонного зондирования в условиях искусственного возмущения верхней ионосферы // *Геомagnetизм и аэрoнoмия*. 1985. Т. 25. № 2. С. 233–238.
- [Бочкарев и др., 1987] *Бочкарев Г. С., Кольцов В. В., Крашенинников И. В., Лянной Б. Е.* Вариации траекторных характеристик сигналов НЗ в условиях искусственно возмущённой ионосферы // *Изв. ВУЗов. Радиофизика*. 1987. Т. 30. № 6. С. 697–702.



- [Вертоградов и др., 2012] *Вертоградов Г. Г., Вертоградова Е. Г., Урядов В. П.* и др. Кластерная структура искусственной ионосферной турбулентности по данным радарных измерений с помощью ионозонда-радиопеленгатора // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55. № 1-2. С. 1–13.
- [Гуревич, 2007] *Гуревич А. В.* Нелинейные явления в ионосфере // УФН. 2007. Т. 177. № 11. С. 1145–1177.
- [Крашенинников, Лянной, 1987] *Крашенинников И. В., Лянной Б. Е.* Модовая структура ионограмм НЗ при некоторых видах искусственного возмущения ионосферы // Геомагнетизм и аэрномия. 1987. Т. 27. № 6. С. 936–942.
- [Тинин, 1982] *Тинин М. В.* Асимптотические методы в волновых и лучевых задачах ионосферного распространения коротких радиоволн: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Иркутск: Иркутский гос. ун-т, 1982.
- [Урядов и др., 2009] *Урядов В. П., Вертоградов Г. Г., Вертоградов В. Г.* и др. Зондирование искусственно возмущённой области ионосферы с помощью ионозонда/пеленгатора с линейной частотной модуляцией сигнала // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2009. Т. 52. № 4. С. 267–277.
- [Фролов и др., 2007] *Фролов В. Л., Бахметьева Н. М., Беликович В. В.* и др. Модификация ионосферы Земли мощным КВ-радиоизлучением // УФН. 2007. Т. 177. № 3. С. 330–340.
- [Honary et al., 2011] *Honary F., Borisov N., Beharell M., Senior A.* Temporal development of the magnetic zenith effect. 2011 // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. A06309. doi: 10.1029/2010JA016029.
- [Hysell et al., 1996] *Hysell D. L., Kelley M. C., Yampolsky Y. M., Beley V. S., Koloskov A. V., Ponomarenko P. V., Tyrnov O. F.* HF radar observations of decaying artificial field-aligned irregularities // J. Geophysical Research. 1996. V. 101. No. A12. P. 26,981–26,993.

## **RADIO SOUNDING OF THE ARTIFICIALLY DISTURBED BY VERTICAL POWERFUL RADIO EMISSION LARGE-SCALE IONOSPHERIC IRREGULARITY**

*I.V.Krasheninnikov*

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of Russian Academy of Sciences (IZMIRAN)

The results of long-time investigations on multi frequency oblique radio-sounding of the large-scale irregularity of the electron density in the F2 region, arising around the reflection height (Upper Hybrid Resonance) vertically incident powerful radio wave in the ionosphere, are presented. On the phenomenological analysis basis of the oblique chirp-sounding data in the non-linear experiments in 2007 the hypothesis concerning possible registration of the capture effect of diagnostic radio waves into artificial large-scale electron density cavity and spot lighting the near-zone heating facility SURA is discussed.

*Keywords:* ionosonde, oblique sounding ionograms, aspect scattering, MUF, artificially disturbed region.