

## Исследование эффекта магнитного зенита методом радиопросвечивания ионосферы сигналами искусственных спутников Земли на частоте 400 МГц

**Ф.И. Выборнов, В.А. Алимов, А.В. Рахлин**

*Федеральное государственное научное учреждение  
"Научно-исследовательский радиофизический институт" (ФГНУ НИРФИ),  
603950, г. Нижний Новгород, ул. Б. Печерская, д. 25/12а  
E-mail: vybornov@nirfi.sci-nnov.ru*

Приводятся результаты измерений амплитуды сигнала искусственного спутника Земли на частоте 400 МГц, полученные в эксперименте по радиопросвечиванию области искусственной ионосферной турбулентности, возбуждаемой мощным среднеширотным нагревным стендом "СУРА", когда сигнал распространялся вдоль силовых линий магнитного поля Земли (эффект магнитного зенита).

**Ключевые слова:** ионосфера, ионосферная турбулентность, радиоволны, амплитудные флуктуации, мелко-масштабные неоднородности, эффект магнитного зенита.

### Введение

Эффект резкого усиления интенсивности и частоты флуктуаций принимаемого сигнала при прохождении радиолуча вблизи направления магнитного зенита отмечалось уже в первых измерениях внутреннего масштаба пространственного спектра флуктуаций электронной концентрации методом радиопросвечивания сигналами искусственных спутников Земли (ИСЗ) на частотах 150 и 400 МГц, которые проводились в высоких широтах в конце семидесятых годов [1]. Позднее аналогичный эффект наблюдался при измерениях спектра амплитудных флуктуаций сигналов ИСЗ на частоте 150 и 400 МГц, прошедших область среднеширотной ионосферы, возмущенную мощным коротковолновым излучением [2-6]. При этом отмечалось, что и на частоте 400 МГц могут наблюдаться достаточно сильные флуктуации амплитуды сигнала [5, 6].

Ниже представлены результаты специальных измерений флуктуаций амплитуды сигналов ИСЗ при воздействии на среднеширотную ионосферу мощного коротковолнового излучения. Особенностью проведенных измерений является то, что они проводились на частоте 400 МГц при такой геометрии траектории ИСЗ, когда принимаемый сигнал распространялся вдоль силовых линий магнитного поля. Это позволило наблюдать в ночь с 13 на 14 мая 2010 г. чрезвычайно сильные флуктуации амплитуды (до 100%) при исследовании эффекта магнитного зенита [7].

### Схема эксперимента и результаты измерений

Измерения проводились на полигоне ФГНУ НИРФИ Васильсурск с 10 по 15 мая 2010 г. в вечернее время в спокойных геофизических условиях. Нагрев ионосферы осуществлялся стендом "Сура" тремя передатчиками (мощность каждого 250 кВт) на частоте 4,6 МГц

вблизи критической частоты F-слоя ионосферы на обыкновенной компоненте. Использовался режим с наклонным положением диаграммы направленности ( $12^\circ$  от вертикали на юг в плоскости магнитного меридиана). Нагревный стенд работал по специальной программе с большими временами нагрева в течение нескольких часов так, что до кульминации ИСЗ сеанс продолжался не менее 30 минут. Прием и регистрация амплитуды сигналов навигационных спутников Земли системы “Парус” осуществлялся с помощью специального приемного комплекса НИРФИ [8], при этом использовались антенна обратной волны (обратного излучения) диаметром 1,6 м с усилителем 20 дБ и четырнадцатиразрядный АЦП.

За указанный период в нескольких сеансах связи с ИСЗ сигнал распространялся под малыми углами относительно силовых линий магнитного поля Земли. Во всех этих сеансах наблюдались мерцания на частоте 400 МГц. На рис. 1 приведена запись амплитуды сигнала ИСЗ №32052 (Cosmos2429) для сеанса связи 14 мая 2010 года (с временем прохождения области магнитного зенита 00 часов 36 минут местного времени), когда наблюдались аномально сильные флуктуации сигнала, и рассчитанные углы ( $KSI$ ) между направлением радиолуча и геомагнитными линиями для высоты 300 км.

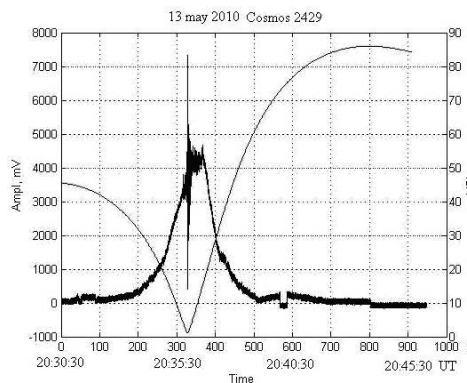


Рис. 1. Графики зависимости амплитуды сигнала ИСЗ №32052 и углов ( $KSI$ ) между направлением радиолуча и геомагнитными линиями для высоты 300 км от времени для сеанса связи 14 мая 2010 г.

Траектория движения ИСЗ с метками времени представлена на рис. 2, где овалом выделено положение проекции диаграммы направленности нагревного стенда без учета рефракции в ионосфере, а положение магнитного зенита обозначено символами MZ. Спутник двигался с юга на север, при этом его траектория для приемного пункта практически оказалась в плоскости магнитного меридиана. На рис. 3 приведены фрагменты исходной (верхний) и детрендрованной и нормированной (нижний) записи с 310 по 370 с. Положению магнитного зенита на записи соответствуют самые сильные изменения сигнала около 330 с, при этом сама запись несимметрична и неоднородна во времени. Значительное усиление флуктуаций сигнала наблюдалось в диапазоне углов  $\pm 3^\circ$  от направления силовых линий магнитного поля Земли, что достаточно хорошо согласуется с теорией и ранее выполненными измерениями при исследовании явления магнитного зенита [1, 4, 7 и 9]. При этом показатель спектра сигнала в диапазоне 1 – 10 Гц оказался равным  $p \approx 1,6$  при среднем индексе мерцаний  $S_4 \approx 0,14$ . Достаточно сложная, хотя и спадающая форма спектра легко объясняется неоднородностью и нестационарностью полученной записи, когда применение только спектральной обработки легко может привести к ошибочным результатам при их физической интерпретации. Выполненные в работе [5] ранее оценки показателя спектра неоднородностей на частоте 400 МГц для серии измерений в 2007 году незначительно отличались в большую сторону при значительно меньшем индексе мерцаний.

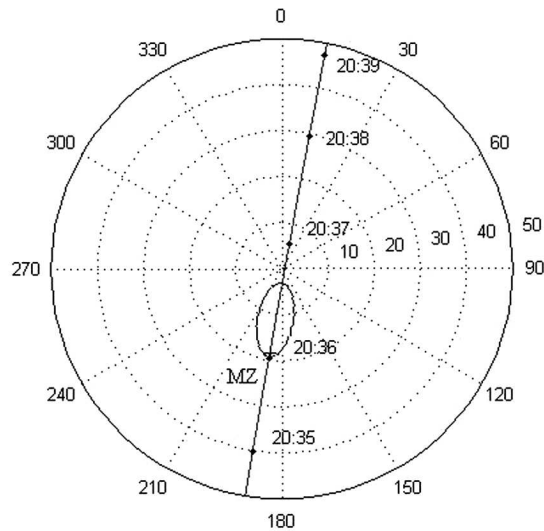


Рис. 2. Траектория ИСЗ №32052 14 мая 2010 г.

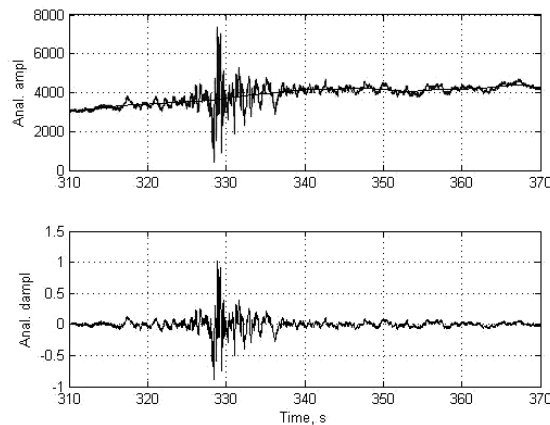


Рис. 3. Фрагменты исходной (верхний) и детрендированной и нормированной (нижний) записи амплитуды сигнала ИСЗ №32052 14 мая 2010 г. с 310 по 370 с

Необходимо отметить, что сигнал ИСЗ № 19419 (Oscar25) на частоте 400 МГц, который принимался в предыдущем сеансе при работе нагревного стенда СУРА 12 мая 2010 года в аналогичных условиях, но для минимального угла между радиолучом и магнитным зенитом  $8^\circ$  (19:22:30 UT) не имел столь сильных мерцаний. Детрендированная структура этого сигнала для интервала записи около 60 секунд была достаточно однородна, а показатель спектра в диапазоне частот 1 – 10 Гц составлял  $p \approx 2,56$  при малом индексе мерцаний  $S_4 \approx 0,05$ .

Во время работы нагревного стенда СУРА состояние ионосферы контролировалось ионосферной станцией "Базис-М". Во всех сеансах связи с ИСЗ во время работы нагревного стенда СУРА наблюдалось явление искусственного частотного F-spread с интенсивностью до 3-х баллов. На рис. 4 представлена ионограмма, полученная во время сеанса связи с ИСЗ 14 мая в 0 часов 40 минут (13 мая 20:40 UT). Критическая частота F2-слоя ионосферы была приблизительно 5 МГц. Сильная искусственная диффузность в этом сеансе объясняется развитием в ионосфере интенсивных искусственных крупномасштабных неоднородностей с поперечными относительно магнитного поля Земли масштабами большими 1 км. Относительные флуктуации электронной концентрации  $\Delta N/N$ , оцененные по методике, предложенной в работе [10], составляли около 30%.

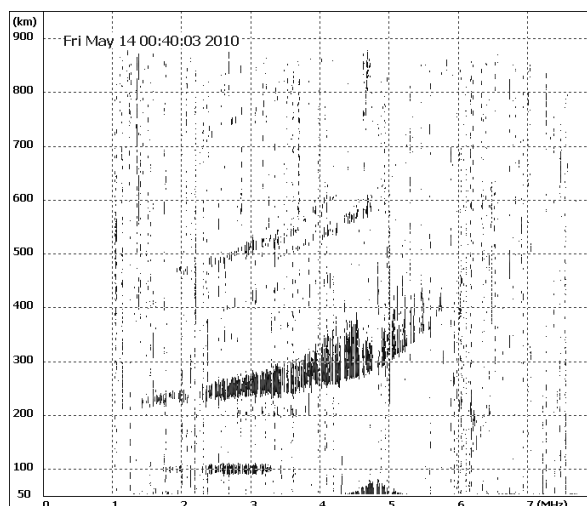


Рис. 4. Ионограмма 14 мая в 0 часов 40 минут (13 мая 20:40 UT). Полигон ФГНУ НИРФИ Васильсурск

Для анализа сильных флуктуаций сигнала в сеансе 13 мая 2010 года использовалось вейвлет-преобразование. На рис. 5 представлен график спектрограммы непрерывного вейвлет-преобразования записанного сигнала с 325 по 335 секунду (1024 точек). Использовался вейвлет "мексиканская шляпа" с центральной частотой 0,25. При частоте регистрации сигнала 100 Гц центральная частота первого уровня разложения ( $a=1$ ) составляла 25 Гц. Значение  $a=100$  обеспечивает частоту просмотра 0,25 Гц. Минимумам соответствует темный цвет спектрограммы.

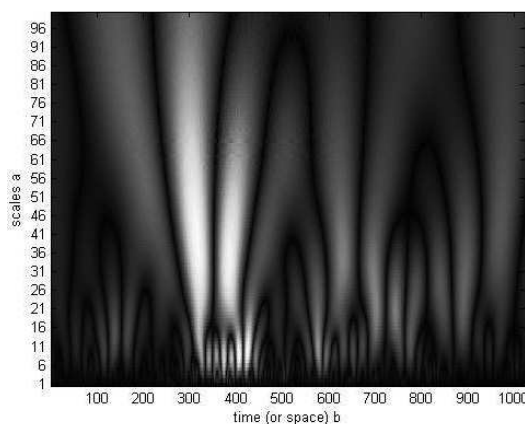


Рис.5. График спектрограммы сигнала ИСЗ №32052 14 мая с 325 по 335 записи

Длительность записи сильных флуктуаций около 12 секунд позволяет оценить размеры области сильных возмущений на высоте F-слоя ионосферы в плоскости магнитного меридиана. Полученные значения 25 – 27 км почти в два раза меньше значений, полученных в отдельных сеансах в работе [11] при использовании для диагностики сигналов навигационных ИСЗ системы GPS. Необходимо отметить, что и значения относительных флуктуаций электронной концентрации  $\Delta N/N$ , приводимые в работе [11], были, как правило, значительно меньше, чем в нашем случае. Анализ спектрограммы позволяет предположить, что внутри возмущенной области существуют особенности, соответствующие 328 – 329 и 331 – 332 секундам записи (соответственно 300 – 400 и 600 – 700 точки оси значений  $b$  спектрограммы). При этом южная граница таких возмущений более резкая, чем северная. Ранее в работе [6] асимметрия области искусственных возмущений объяснялась

влиянием толстого слоя неоднородностей, возникающего над областью нагрева в результате конвективных процессов. В целом, полученные измерения хорошо согласуются с моделью искусственных возмущений в области магнитного зенита, предложенной в [6], где отмечается, что на высоте максимума F2-слоя среднеширотной ионосферы образуются сильно вытянутые мелкомасштабные неоднородности электронной концентрации с размерами около 10 км вдоль направления магнитного поля Земли и размерами  $10 \div 300$  м поперек магнитного поля. Эффективная толщина слоя с этими неоднородностями может составлять  $10 \div 20$  км. Тем не менее, необходимо отметить, что выделенные на спектрограммах особенности могут свидетельствовать о более сложной структуре области возмущения, что может приводить, например, к явлениям фокусировки (см. [11]).

### Заключение

При наклонном радиозондировании области искусственных возмущений F-слоя ионосферы под малыми углами между лучом зрения на спутник и направлением магнитного поля Земли обнаружена сильно неоднородная структура мелкомасштабной искусственной турбулентности, которая объясняется влиянием эффекта магнитного зенита. При воздействии на ионосферу мощного коротковолнового излучения, распространяющегося в направлении геомагнитного поля, возможно наблюдение чрезвычайно сильных (до 100%) амплитудных флуктуаций сигнала ИСЗ даже на частоте 400 МГц. Это свидетельствует о сильной степени вытянутости искусственных мелкомасштабных ионосферных неоднородностей вдоль силовых линий магнитного поля Земли.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 09-02-97026-р\_поволжье\_a.

### Литература

1. *Ерухимов Л.М., Косолапенко В.И., Лернер А.М., Мясников Е.Н.* О форме спектра неоднородностей высокоширотной ионосферы в направлении геомагнитного поля // Известия ВУЗов. Радиофизика. 1981. Т. 24, №5. С.524 – 528.
2. *Выборнов Ф.И., Ерухимов Л.М., Комраков Г.П.* и др. Измерение спектра флуктуаций фазы и амплитуды сигналов ИСЗ при воздействии мощного радиоизлучения на ионосферу // Известия ВУЗов. Радиофизика. 1986. Т. 29, №4. С.491 – 494.
3. *Выборнов Ф.И., Ерухимов Л.М., Муравьева Н.В., Мясников Е.Н.* Определение величины продольного геомагнитному полю внутреннего масштаба искусственной ионосферной турбулентности // Известия ВУЗов. Радиофизика. 1994. Т. 37, №4. С.521-525.
4. *Мясников Е.Н., Муравьева Н. В.* Характеристики пространственного спектра неоднородностей плазмы, возбуждаемых на средних широтах мощным стендом "СУРА" // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 8. С. 722 – 730.
5. *Алимов В.А., Выборнов Ф.И., Мясников Е.Н., Рахлин А.В., Фролов В.Л.* Исследование эффекта магнитного зенита по результатам наблюдений за искусственной ионосферной турбулентностью // XXII Всероссийская научная конференция "Распространение радиоволн" РРВ-22 г. Ростов-на-Дону – п. Лоо, 22-26 сентября 2008 г. Труды симпозиума. Том II – Ростов-на-Дону: изд-во СКНЦ ВШ ЮФУ АПСН, 2008. – 296 стр. С. 179-181.
6. *Алимов В.А., Выборнов Ф.И., Мясников Е.Н.* и др. Эффект магнитного зенита и некоторые особенности мультифрактальной структуры мелкомасштабной искусственной ионосферной турбулентности // Известия ВУЗов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 9. С. 679 – 689.

7. Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере // УФН. 2007. Т. 177, №11. С. 1145–1177.
8. Алимов В.А., Выборнов Ф.И., Рахлин А.В. Методика экспериментальных исследований статистических характеристик радиоволн при вертикальном зондировании ионосферы и наземном приеме МВ ДМВ сигналов орбитальных ИСЗ «Транзит» // Препринт НИРФИ № 414. Н.Новгород. 1995. 15 с.
9. Гершман Б.Н., Ерухимов Л.М., Яшин Ю.Я. Волновые явления в ионосферной и космической плазме. М.: Наука, 1984. 392 с.
10. Алимов В.А., Выборнов Ф.И., Караштин А.Н. и др. Распределение электронной концентрации в верхней ионосфере в условиях среднеширотного F-spread // Известия ВУЗов. Радиофизика. 2002. Т. 45. № 3. С. 207 – 213.
11. Фролов В.Л., Комраков Г.П., Куницын В.Е. и др. Зондирование возмущенной излучением нагревного стенда «Сура» ионосферы сигналами навигационных спутников системы GPS // Известия ВУЗов. Радиофизика. 2010. Т. 53. № 7. С. 421 – 444.

## The magnetic zenith effect investigation by a radiosounding of the ionosphere by artificial satellite signals at a 400 MHz frequency

F.I. Vybornov, V.A. Alimov, A.V. Rakhlin

*Radiophysical Research Institute,  
603950, Nizhny Novgorod, B. Pecherskaya st., 25/12a  
E-mail: vybornov@nirfi.sci-nnov.ru*

The results of measuring the amplitude signal from artificial satellite at frequency of 400 MHz are listed. The data are obtained using the experiment on radio sounding of artificial ionospheric turbulence (AIT) region. AIT is stimulated by the mid-latitude high-power “Sura” heating facility, when the signal from on-orbit satellites propagates along the geomagnetic field lines (the effect of the magnetic zenith).

**Keywords:** ionosphere, ionosphere turbulence, radio waves, amplitude fluctuations, small-scale irregularities, the effect of the magnetic zenith.