

## ОДНОВРЕМЕННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ИОНОСФЕРНЫХ МЕРЦАНИЙ В МЕТРОВИИ И ДЕЦИМЕТРОВИИ ДИАПАЗОНАХ В НАПРАВЛЕНИИ МАГНИТНОГО ЗЕНИТА

М.В. Глоба, Р.В. Васильев, Ю.В. Ясюкевич

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия  
globa@iszf.irk.ru

## SIMULTANEOUS OBSERVATIONS OF METRIC AND DECIMETRIC IONOSPHERIC SCINTILLATIONS IN THE MAGNETIC ZENITH DIRECTION

M.V. Globa, R.V. Vasilyev, Yu.V. Yasyukevich

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

**Аннотация.** В работе исследован эффект магнитного зенита для различных частотных диапазонов, проявляющийся в усилении ионосферных мерцаний радиосигнала при уменьшении угла между лучом зрения на источник сигнала и вектором геомагнитного поля. Данные получены на инструментах Обсерватории радиофизической диагностики атмосферы ИСЗФ СО РАН — Иркутском радаре некогерентного рассеяния (ИРНР) и приемнике навигационных сигналов Novatel GPStation-6. Получены распределения интенсивности мерцаний от угла между направлением на источник и геомагнитным полем, которые показывают наличие эффекта магнитного зенита для амплитудных мерцаний Лебеда-А, наблюдаемых на ИРНР, и фазовых мерцаний навигационных сигналов.

**Ключевые слова:** ионосферные мерцания, мелкомасштабные неоднородности, эффект магнитного зенита.

**Abstract.** We study the magnetic zenith effect for different frequency bands, which manifests itself as increase in intensity of ionospheric scintillations when decreasing the angle between line of sight (LOS) to the source of the signal and geomagnetic field vector. Data were obtained by facilities Observatory of Radio Diagnostics of the Atmosphere of ISTP SB RAS — Irkutsk Incoherent Scatter Radar (IISR) and Novatel GPStation-6 receiver. We have obtained scintillation intensity distributions depending on the angle between LOS and geomagnetic field. The distributions demonstrate the presence of magnetic zenith effect for Cygnus-A amplitude scintillations observed at IISR, and phase scintillations of navigation signals.

**Key words:** ionospheric scintillations, small-scale irregularities, magnetic zenith effect.

### Введение

Мерцания радиосигнала в ионосфере возникают вследствие рассеяния на ионосферных неоднородностях, размеры которых близки к размеру первой зоны Френеля для частоты сигнала. Это явление было хорошо изучено в прошлом столетии [Yeh, Liu, 1982]. Метод мерцаний при помощи спектрального анализа позволяет оценивать спектр пространственных размеров ионосферных неоднородностей и их скорость движения [Безродный и др., 2007]. Также существуют более простые статистические методы анализа вариаций сигнала, которые позволяют оценивать степень развития ионосферных возмущений [Rodrigues et al., 2004]. В ряде работ было показано, что интенсивность мерцаний радиосигнала усиливается при уменьшении угла между лучом зрения на источник сигнала и вектором геомагнитного поля [Алимов и др., 2009; Jiao et al., 2013]. Этот эффект носит название «эффект магнитного зенита». Считается, что причиной возникновения этого эффекта являются неоднородности ионосферной плазмы, вытянутые вдоль линий геомагнитного поля.

### Наблюдения эффекта магнитного зенита

В данной работе мерцания в направлении магнитного зенита наблюдались на установках обсерватории радиозондирования атмосферы ИСЗФ СО РАН — Иркутском радаре некогерентного рассеяния (ИРНР), работающего в диапазоне 154–162 МГц, и приемнике

навигационного сигнала Novatel GPStation-6, работающего на частотах ~1.2 и ~1.6 ГГц. Данные на ИРНР были получены в период с 18.06.2015 по 1.07.2015. ИРНР в данном эксперименте работал в пассивном режиме, без излучения радиосигналов, как радиотелескоп, регистрирующий космический шум. Такой режим позволяет измерять мощность радиоисточника Лебедь-А с хорошим временным разрешением, что дает возможность исследовать быстрые амплитудные вариации радиосигнала при помощи индекса мерцаний S4, а также проводить их спектральный анализ. В работе [Vasilyev et al., 2017] было показано, что при приближении источника к магнитному зениту спектр мерцаний расширяется, за счет чего происходит увеличение индекса мерцаний S4. Временное разрешение приемника навигационного сигнала недостаточно для проведения спектрального анализа, но, тем не менее, приемник позволяет измерять как амплитудные (S4), так и фазовые ( $\sigma_\phi$ ) мерцания с временным разрешением 1 мин.

На рис. 1 представлено распределение индекса мерцаний S4 сигнала Лебеда-А, зарегистрированного на ИРНР, по углам между лучом зрения на источник и вектором геомагнитного поля за все дни наблюдений. По всей видимости, мерцания в метровом диапазоне имеют нестационарную природу, так как проявляются примерно в 30 % случаях. к примеру, в 170-й и 179-й дни мерцания не наблюдались, поэтому на распределении не видно усиления интенсивности на высоких углах. Но для тех дней, когда наблюдались сильные мерцания, они в основном

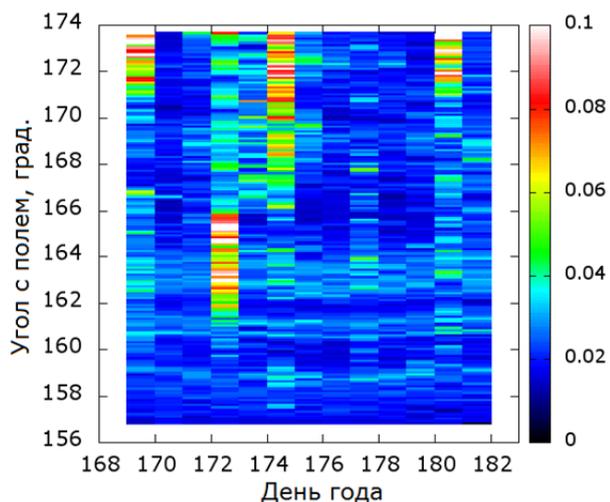


Рис. 1. Распределение S4 по углам между лучом зрения на источник и вектором магнитного поля для сигнала Лебеда-А по данным ИРНР

сосредоточены около магнитного зенита, например, для 168-го и 181-го дней. В 172-й день сильные мерцания были следствием геомагнитной бури и наблюдались уже после того, как источник прошел вблизи магнитного зенита. Усиление индекса мерцаний, проявляющееся во все дни на углах 158–164°, не имеет отношения к ионосферным неоднородностям и связано с влиянием диаграммы направленности ИРНР.

Такие же распределения для амплитудных (S4) и фазовых ( $\sigma_\phi$ ) мерцаний были получены для навигационного сигнала спутников GPS и GLONASS (рис. 2, 3). В навигационном сигнале подобная зависимость проявляется только для фазовых мерцаний ( $\sigma_\phi$ ) — их интенсивность увеличивается при приближении спутника к магнитному зениту. Наибольшая интенсивность амплитудных мерцаний (S4) приходится на углы менее 140° и, вероятнее всего, связана с наличием техногенных помех. Небольшое и нерегулярное усиление амплитудных мерцаний в магнитном зените можно увидеть только на распределениях для сигнала спутников GLONASS.

Усредненные распределения за весь период наблюдений (рис. 4) позволяют более четко проследить поведение мерцаний в зависимости от направления магнитного поля к лучу зрения, а также выявить характер этих зависимостей индекса мерцаний от наклона луча зрения к магнитному полю на усредненных распределениях существует только для амплитудных мерцаний метрового диапазона и фазовых мерцаний дециметрового диапазона. Стоит отметить различный характер этих зависимостей — S4 возрастает экспоненциально при приближении источника к магнитному зениту (рис. 4, а), по крайней мере, в доступном для наблюдения диапазоне углов, тогда как для  $\sigma_\phi$  наблюдается некое насыщение (рис. 4, в). Для амплитудных мерцаний навигационного сигнала зависимости от магнитного поля не обнаружено (рис. 4, б).

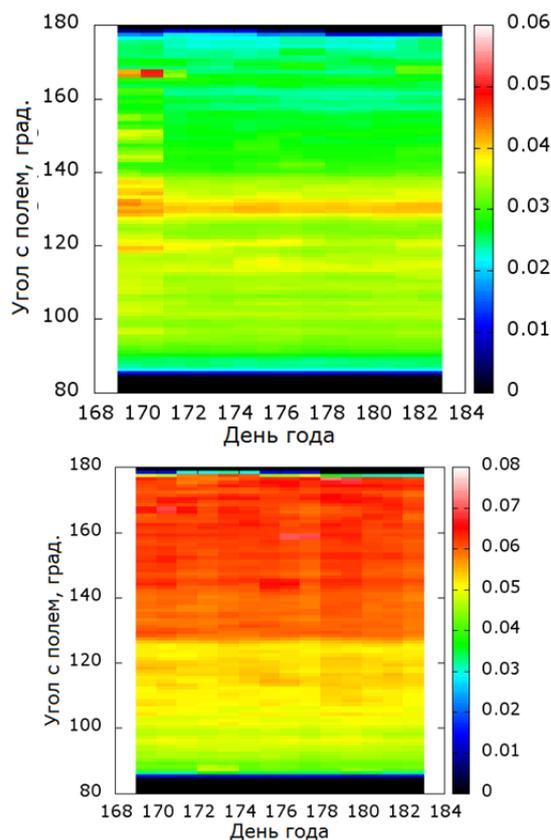


Рис. 2. Распределение S4 (вверху) и  $\sigma_\phi$  (внизу) по углам между лучом зрения на спутник и вектором магнитного поля за 15 дней по данным GPS

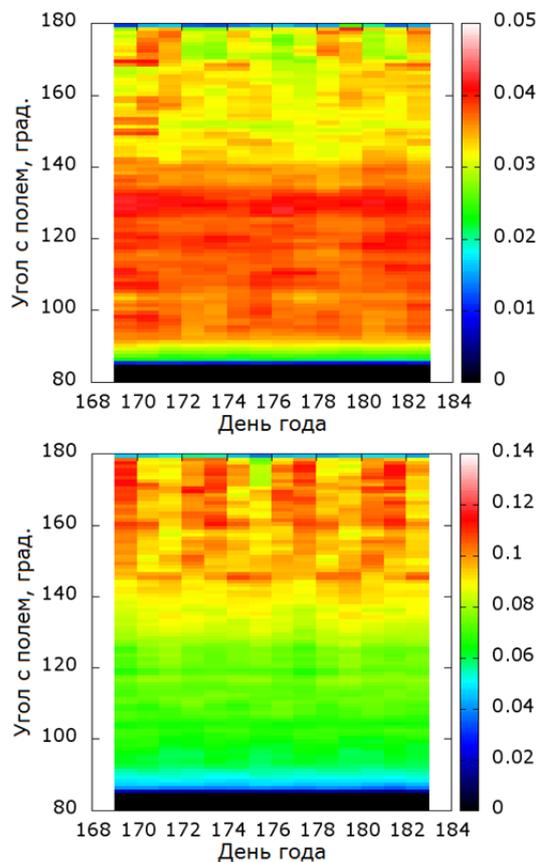


Рис. 3. То же, что на рис. 2, для спутников GLONASS

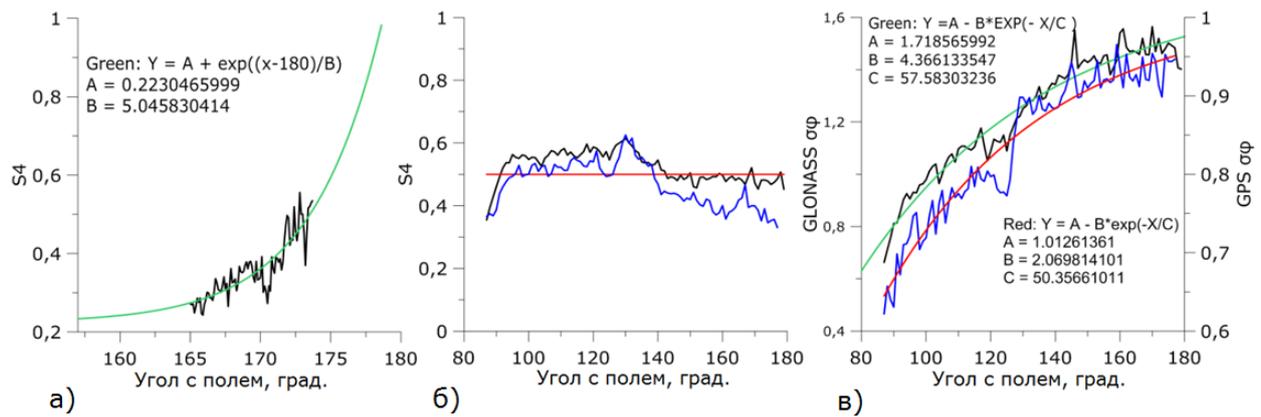


Рис. 4. Усредненные распределения индекса S4 для Лебеда-А (а), индексов S4 (б) и  $\sigma_\phi$  (в) для GPS (синие линии) и GLONASS (черные линии) по углам между лучом зрения и магнитным полем за 15 дней наблюдений

### Заключение

Несмотря на то, что мерцания на ИРНР в период наблюдений происходили относительно редко, можно увидеть, что в те дни, когда мерцания наблюдались, максимум их интенсивности находился близко к  $180^\circ$ , что соответствует направлению наблюдений в магнитный зенит. Единственное исключение — день, когда происходила сильная геомагнитная буря (22 июня 2015, 172-й день года). Для данных навигационных спутников эффект магнитного зенита проявляется только для мерцаний фазы. Из полученных распределений можно сделать вывод о том, что в спокойных условиях в ионосфере возникают неоднородности, вытянутые вдоль линий геомагнитного поля, вызывающие амплитудные мерцания в метровом диапазоне и фазовые мерцания в дециметровом диапазоне длин волн. В дальнейшем планируется провести более детальный анализ наблюдаемого явления с целью определения параметров ионосферных неоднородностей, вызывающих мерцания, а также проводить регулярные наблюдения мерцаний на обоих инструментах и проследить сезонно-суточные вариации мерцаний в магнитном зените в различных диапазонах длин волн.

Работа выполнена в рамках гранта № НШ-6894.2016.5 Президента РФ государственной поддержки ведущих научных школ РФ и гранта РФФИ № 15-05-03946.

Экспериментальные данные были получены на уникальной научной установке — Иркутском радаре некогерентного рассеяния, рег. № 01-28.

### Список литературы

- Алимов В.А., Выборнов Ф.И., Мясников Е.Н. и др. Эффект магнитного зенита и некоторые особенности мультифрактальной структуры мелкомасштабной иерархической ионосферной турбулентности // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 9. С. 679–689.
- Безродный В.Г., Воткинс Б., Галушко В.Г. и др. Наблюдение ионосферных мерцаний дискретных космических источников с помощью панорамного ВЧ риометра // Радиофизика и радиоастрономия. 2007. Т. 12, № 3. С. 242–260.
- Yu Jiao, Yu T. Morton, Taylor S., Pelgrum W. Characterization of high-latitude ionospheric scintillation of GPS signals // Radio Sci. 2013. V. 48. P. 698–708. DOI: 10.1002/2013RS005259.
- Rodrigues F.S., Marcio H.O. Dodson A.A., et al. Statistical Analysis of GPS Ionospheric Scintillation and Short-Time TEC Variations over Northern Europe // Navigation: J. of the Institute of Navigation. 2004. V. 51, N 1.
- Vasilyev R., Globa M., Kushnarev D., et al. Spectral characteristics of ionospheric scintillations of UHF radio signal near magnetic zenith // arXiv:1702.01966 [physics.geo-ph], 2017.
- Kung Chie Yeh, Chao-Han Liu. Radio wave scintillations in the ionosphere // Proc. IEEE. 1982. V. 70, N 4. P. 324–360. DOI: 10.1109/PROC.1982.12313.