

Среднеширотные магнитоориентированные ионосферные плазменные образования и их влияние на работу систем дифференциальной навигации GPS и радиоинтерферометров с большой базой

Э.Л. Афраймович, Э.И. Астафьева, А.Б. Ишин, Е.А. Косогоров, Ю.В. Ясюкевич

*Институт Солнечно-Земной Физики СО РАН,
Иркутск, Россия, 664033, а/я 291*

*E-mails: afrapub@iszf.irk.ru; ellienda@iszf.irk.ru; ishin@iszf.irk.ru;
e.kosogorov@orange-ftgroup.ru; yasukevich@iszf.irk.ru;*

Впервые с использованием метода сканирования магнитного зенита лучами «наземный приемник-спутник GPS» показано, что зарегистрированные над Калифорнией 5 октября 2001 г. необычные изолированные ионосферные неоднородности представляют собой движущиеся на север магнитоориентированные плазменные возмущения (МОПВ). МОПВ характеризуются положительным отклонением полного электронного содержания (ПЭС) относительно фона амплитудой до 4 TECU ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ эл}/\text{м}^2$). Соответствующие вариации ПЭС имеют вид единичного импульса длительностью порядка 40 мин. Приводятся оценки влияния подобных образований на работу дифференциальных систем GPS (DGPS). При работе современных широкобазисных и среднебазисных радиоинтерферометров типа LOFAR, SKA возникает ряд проблем связанных с изменением параметров принимаемого радиосигнала. Для анализируемого примера приводятся соответствующие оценки ошибки фазы, доплеровского смещения частоты и рефракционного отклонения на выбранной частоте 100 МГц.

Ключевые слова: GPS, blobs, ионосфера, магнитоориентированные неоднородности

Введение

Крупномасштабным ионосферным неоднородностям, вытянутым по магнитному полю посвящено множество работ. В литературе рассматривается два типа таких неоднородностей – баблы (bubbles, пузыри) и блобы (blobs) [1-4]. Однако в большинстве работ данные о пространственной геометрии магнитоориентированных неоднородностей (МОН) отсутствуют. Для примера, авторы [1] установили, что их наблюдения представляют проявление бабла используя только следующие критерии: время появления (после заката), наличие фазовых сбоев, уменьшение полного электронного содержания (ПЭС) и плотности электронной концентрации на спутнике DMSP. Однако упомянутые выше критерии недостаточны для идентификации пузыря. Необходимо получить более прямое доказательство вытянутости структуры вдоль магнитной силовой линии (как, например, в работе [2]).

Крупномасштабные плазменные пузыри, связанные с явлением экваториального F-рассеяния (equatorial spread F, ESF) генерируются в нижней части F области и затем проникают выше максимума F слоя [3]. Баблы имеют характерную структуру - они развиваются вдоль магнитной силовой линии. Таким образом, они вытянуты в меридиональном направлении и узкие в зональном. Они имеют конечную высоту, их распространение в полярную область ограничено высотой над экватором, поэтому они редко наблюдаются на

средних широтах. Авторы [2] представили измерения сильного уменьшения плотности электронной концентрации на высоте 840 км на основе данных спутника DMSP и показали, что плазменный бабл, вызванный опустошением магнитной силовой линии на магнитной широте 46° , достигает высоты над магнитным экватором ~ 6800 км. На основе анализа ионосферных мерцаний было получено, что для баблов характерно восточное направление движения со скоростью порядка 100-200 м/с [5].

Плазменный блоб - более редкое явление, также связанное с ESF и имеющее близкую к баблам природу [4]. Блобы представляют собой увеличение электронной концентрации, составляющее $\sim 50\text{-}100\%$ от фонового уровня. Обычно они наблюдаются на низких магнитных широтах и имеют протяжение до нескольких сот километров.

Основное число работ по исследованию баблов и блобов было осуществлено на основе непосредственных измерений электронной концентрации. Только в отдельных работах наряду с измерениями электронной концентрации привлечены измерения ПЭС [1, 2]. Целью настоящей работы является описание метода GPS детектирования среднеширотных магнитоориентированных возмущений и неоднородностей и оценка их влияния на радиотехнические системы на примере необычного явления, имевшего место 5 октября 2001 г. над Калифорнией [6].

Метод сканирования магнитного зенита для детектирования среднеширотных магнитоориентированных неоднородностей

Если изолированная неоднородность вытянута вдоль магнитной силовой линии, то при пересечении ее лучами «спутник-приемник» под разными углами мы должны увидеть следующую картину: при приближении луча к области магнитного зенита (т.е. когда луч параллелен магнитному полю) ПЭС будет возрастать (убывать для баблов). При этом мы считаем, что наклонение магнитного поля с высотой меняется достаточно слабо (по крайней мере, на высотах, вносящих определяющий вклад в вариации ПЭС) и линия магнитного поля практически прямая. Тогда во временной области при прохождении области магнитного зенита мы будем видеть «горб» ПЭС.

На рис. 1а представлена схема сканирования магнитного зенита 5 октября 2001 г. Закрашенный прямоугольник на рис. 1а отмечает область внутри МОН с резким повышением электронной концентрации по сравнению с фоновым значением. Изменяя угол γ , мы имеем возможность сканировать неоднородность. Используемые нами данные доступны в стандартном формате RINEX с разрешением по времени 30 секунд. Стандартный метод GPS позволяет детектировать волновые возмущения на основе фазовых измерений наклонного ПЭС вдоль луча зрения между приемной станцией и спутником GPS [7]

5 Октября 2001 г. (день 278)

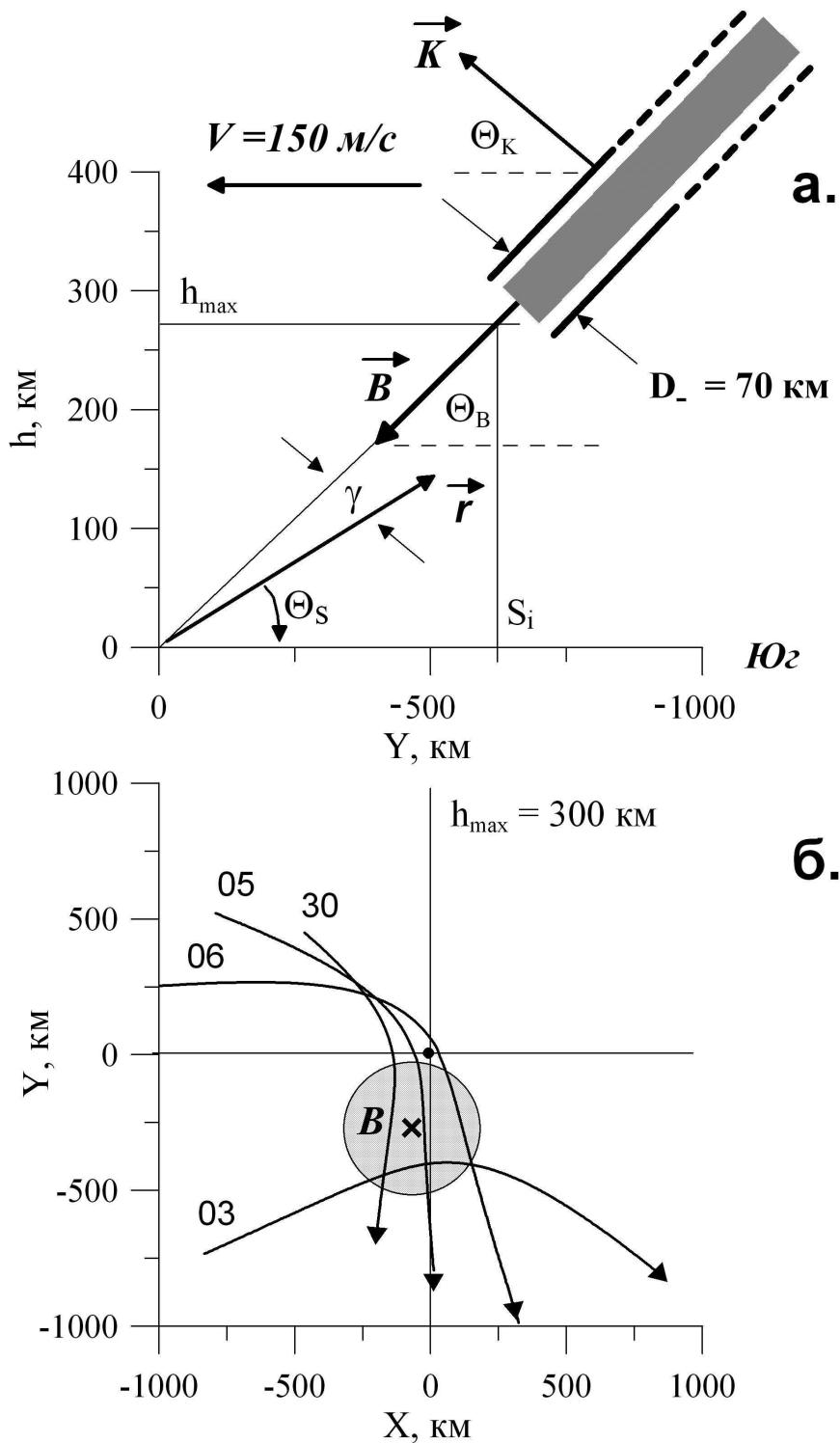


Рис. 1. (а) - схема сканирования магнитного зенита для события 5 октября 2001 г. Оси h , Y , X направлены в зенит, на север и на восток, соответственно. Стрелочками отмечены направление волнового вектора \vec{K} , направление вдоль луча «спутник GPS – приемник» \vec{r} , вектор магнитного поля \vec{B} и направление перемещения МОН. S_i – подионосферная точка; θ_s – угол между направлением \vec{r} и земной поверхностью в области приемника; γ – угол между векторами \vec{B} и \vec{r} . D_{\perp} – попречный размер МОН в вертикальной плоскости. Заполненный прямоугольник отмечает область внутри МОН с резким изменением ПЭС по сравнению с фоновым значением. (б) – траектории подионосферных точек вблизи GPS станции AGMT для следов A , B , C и D , закрашенная окружность отмечает область углов места с отклонением относительно вектора $\vec{B} \sim 10^\circ$

$$I_s(t) = \frac{1}{40.308} \frac{f_1^2 f_2^2}{(f_1^2 - f_2^2)} [(L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) + const + nL], \quad (1)$$

где $L_1 \lambda_1$ и $L_2 \lambda_2$ – дополнительный ионосферный фазовый путь радиосигнала (м); L_1 и L_2 – число полных поворотов фазы на частотах f_1 и f_2 ; λ_1 и λ_2 – соответствующие длины волн; $const$ – неопределенность начальной фазы (м); nL – ошибка определения фазового пути (м).

Для того чтобы устраниить регулярные изменения ионосферы, а также тренды, обусловленные орбитальным движением спутника, мы вычисляем вариации ПЭС $dI(t)$ путем фильтрации исходных рядов $I(t)$ в выбранном диапазоне периодов (например, 2-60 мин.). Далее нам необходимо выбрать вариации ПЭС, имеющие вид «горба». Стоит отметить, что при фильтрации такие неоднородности будут иметь вид N-волны. Мы использовали разработанную в ИСЗФ методику детектирования изолированных ионосферных неоднородностей типа спайков [6].

Детектирование спайков осуществляется на основе следующих критериев. Сначала выбираются вариации ПЭС для которых среднеквадратичное отклонение (СКО) превышает заданный порог. В настоящей работе использовался порог СКО=0.1 TECU. Далее для каждого отфильтрованного ряда проверялось условия «одиночности» выброса ПЭС: 1) максимальное значение вариаций ПЭС превышает значение СКО по крайней мере в 3 раза; 2) Амплитуда другого максимума не превышала половину от максимального значения ПЭС. Кроме того, мы отбрасывали импульсы ПЭС с полудлительностью более 30 мин.

Наша основная идея заключается в том, чтобы проверить соответствие направления луча «спутник GPS – приемник» и направления вектора магнитного поля на высоте максимума ионосферного F2 слоя h_{max} , и на основе этого отобрать ионосферные возмущения, расположенные вдоль магнитной силовой линии. Необходимо помнить про ограничения накладываемые геометрией зондирования. На рис. 1б даны траектории подионосферных точек 5 октября 2001 г. для GPS станции AGMT для четырех спутников GPS. Номера PRN указаны возле соответствующей траектории. Далеко не все траектории проходят через область магнитного зенита, поэтому не для всех спутников блоб будет одинаково хорошо проявляться.

На первом шаге мы определяем координаты подионосферных точек S_i [7] на высоте h_{max} в географической системе координат. Далее мы рассчитываем направление магнитной силовой линии на высоте h_{max} для подионосферной точки S_i с использованием международной справочной модели IGRF-10 и вычисляем угол между векторами \vec{r} и \vec{B} .

Дополнительно мы анализируем скорость перемещения неоднородностей, направление волнового фронта на основе метода SADM-GPS [7], а также полудлительность МОН,

абсолютную и относительную амплитуду возмущения. Данный анализ является дополнительным, и мы лишь вкратце останавливаемся на нем, отсылая читателя к работе [6]. Поперечный размер неоднородности D_- определяется как:

$$D_- = h_{\max} (\theta_{S,\max} - \theta_{S,\min}) / \sin \theta_S, \quad (2)$$

где углы места $\theta_{S,\max}$ и $\theta_{S,\min}$ соответствуют времени начала регистрации МОН и максимума МОН (t_{\min} и t_{\max}), соответственно.

МОН над Калифорнией 5 октября 2001 г.

В этот день между 08:00 и 18:00 UT на ряде станций GPS, расположенных в Калифорнии, США ($220\text{--}260^\circ\text{E}$; $28\text{--}42^\circ\text{N}$), было зарегистрировано большое число изолированных ионосферных возмущений (ИИВ), проявляющихся в вариациях ПЭС в форме отдельного апериодического возмущения ПЭС длительностью порядка 20-40 мин. Согласно данным Интернет для данного региона США и рассматриваемого временного интервала не было мощных естественных или антропогенных событий способных вызывать столь значительные вариации ПЭС. Общее число станций GPS в Калифорнии, используемых при анализе, составляет 242, а число лучей, пронизывающих в рассматриваемый интервал времени ионосферу над территорией США составляло ~ 1035 .

Для анализа геомагнитной обстановки мы использовали данные магнитной обсерватории Victoria. Во время наблюдений ИИВ значение Bz было практически 0 (Рис. 2а, сплошная кривая), индекса Dst – $-30\text{--}40$ нТл (Рис. 2а, пунктирная кривая), K_p – от 1 до 3 (Рис. 2б). Таким образом, можно характеризовать геомагнитные условия 5 октября 2001 г. как слабо возмущенные. Это могло, конечно, привести к некоторому увеличению фоновых флюктуаций [7], но не могло вызывать такие значительные вариации ПЭС.

Типичные вариации ПЭС 5 октября 2001, полученные по данным GPS станции AGMT, представлены на рис. 3 (а, б). ИИВ проявляется в вариациях ПЭС как отдельное апериодическое возмущение. Черной кривой на рис. 3а и 3б приведены, соответственно, исходный ряд ПЭС $I(t)$ и вариации ПЭС отфильтрованные в диапазоне периодов 2-60 мин $dI(t)$. t_{\min} и t_{\max} – время начала регистрации возмущения ПЭС и время регистрации максимума возмущения ПЭС. Полудлительность ИИВ определяется как $\Delta T = t_{\max} - t_{\min}$. Абсолютное значение амплитуды ИИВ достаточно сложно определить, так как его длительность близка к постоянной времени суточных вариаций. Вариации ПЭС, отфильтрованные в диапазоне 2-60 мин., характеризуются кажущимся уменьшением ПЭС относительно фона.

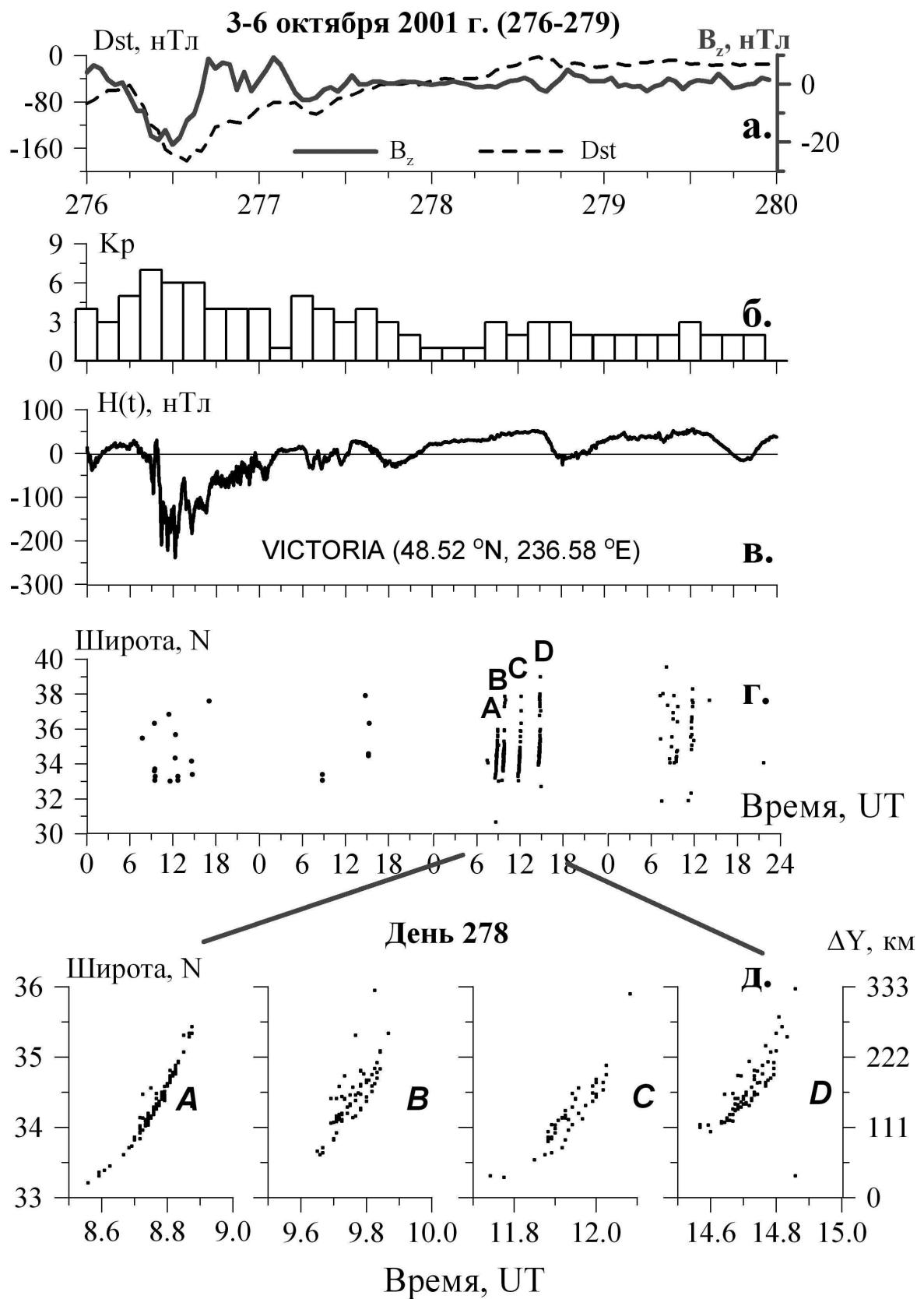


Рис. 2. (а) – вариации геомагнитного поля Dst 5 октября 2001 г. (толстая серая линия) и B_z -компоненты (пунктирная линия); (б) – K_p индекс; (в) – вариации горизонтальной компоненты геомагнитного поля по данным станции Vicotoria. (г) – распределение значений подионосферных точек лучей «спутник GPS – приемник», соответствующих времени t_{min} , для всех МОН зарегистрированных в этот день всеми станциями GPS над рассматриваемым регионом Калифорнии. Буквы **A**, **B**, **C** и **D** на панели (г) отмечают «следы» МОН, представленные также на нижней панели (д) с более высоким временным разрешением. Правая шкала на панели (д) отмечает линейную координату ΔY в топоцентрической системе отсчета

Однако, как видно из рис. 3а, возмущение ПЭС характеризуется превышением ПЭС над фоновым уровнем (см. аппроксимацию невозмущенного ПЭС $I(t)_{00}$ – серая кривая). Разность между исходным рядом ПЭС и его невозмущенной аппроксимацией $dI(t)_{00}=I(t)-I(t)_{00}$ представляет собой более корректную форму вариаций ПЭС при прохождении ИИВ (рис. 3б, толстая серая линия). Стоит отметить, что наибольшее отклонение ПЭС относительно момента времени t_{min} для отфильтрованных вариаций меньше, чем для разностной вариации $dI(t)_{00}$ (для данной станции 1.93 и 3.34 TECU, соответственно), но при автоматической обработке мы рассчитывали амплитуду отфильтрованных вариаций.

На рис. 2г представлено распределение значений широт станций GPS, для времени t_{min} . Буквы **A**, **B**, **C**, и **D** отмечают «следы» ИИВ, представленных с большим разрешением по времени на рис. 2д. Абсолютная амплитуда отклонения ПЭС при прохождении ИИВ dI для следа А составляет ~ 3 TECU. Фоновое значение ПЭС I_0 , вычисленное по картам ПЭС IONEX (<ftp://cddisa.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex/>), составляет ~ 15 TECU. Следовательно, относительная амплитуда ИИВ dI/I_0 достигает 20%, что на порядок превышает амплитуду типичных фоновых флуктуаций.

С использованием метода SADM-GPS для GPS решеток в работе [6] для выбранного интервала времени были определены средние значения азимута $\langle\alpha\rangle$ и угла места $\langle\theta\rangle$ волнового вектора К и горизонтальной скорости $\langle V\rangle$ возмущения. Соответствующие значения для параметров ИИВ, а также номер спутника PRN и число решеток GPS M (общее число решеток GPS составляло 280-660) для каждого следа **A**, **B**, **C**, **D** представлены в таблице 1. Анализ показал четко выраженное направление перемещение ИИВ в северном направлении (рис. 2д). Горизонтальная компонента вектора скорости составляла 70-180 м/с. Угол места волнового вектора \vec{K} при этом имеет небольшое положительное значение $\sim 22\text{-}24^\circ$ (Таблица 1, строка 8).

На рис. 3г представлен градиент ПЭС $\Delta I=I_1-I_2$ между двумя разнесенными станциями GPS для следа А. Исходные ряды ПЭС I_1 и I_2 для двух разнесенных станций GPS 1 (LINC) и 2 (BLIT) с длиной базы $D=621$ км представлены на рис. 3в. Как можно видеть, дифференциальное отклонение ПЭС ΔI двух разнесенных станций близко по форме к разности между исходным рядом ПЭС и невозмущенной аппроксимацией $dI(t)_{00}=I(t)-I(t)_{00}$ (рис. 3б).

При прохождении МОН, значения пространственного градиента ПЭС $G(t)$ и производной ПЭС по времени ROT достаточно велики. Шкала для соответствующих вариаций градиента ПЭС G (который достигает 1 TECU/ $^\circ$) нанесена на рис. 3. справа. Наклонная кривая отмечает резкое возрастание ΔI со временем и имеет значительный наклон ROT порядка 0.33 TECU/мин. Величина параметров G и ROT превышает фоновые значения на порядок и сравнима со значениями G и ROT во время сильных геомагнитных бурь [7]. Таблица 1 содержит данные параметры для каждого следа **A**, **B**, **C** и **D**.

5 октября 2001 г. (день 278)
AGMT, 34.6 N, 243.6 E, PRN05

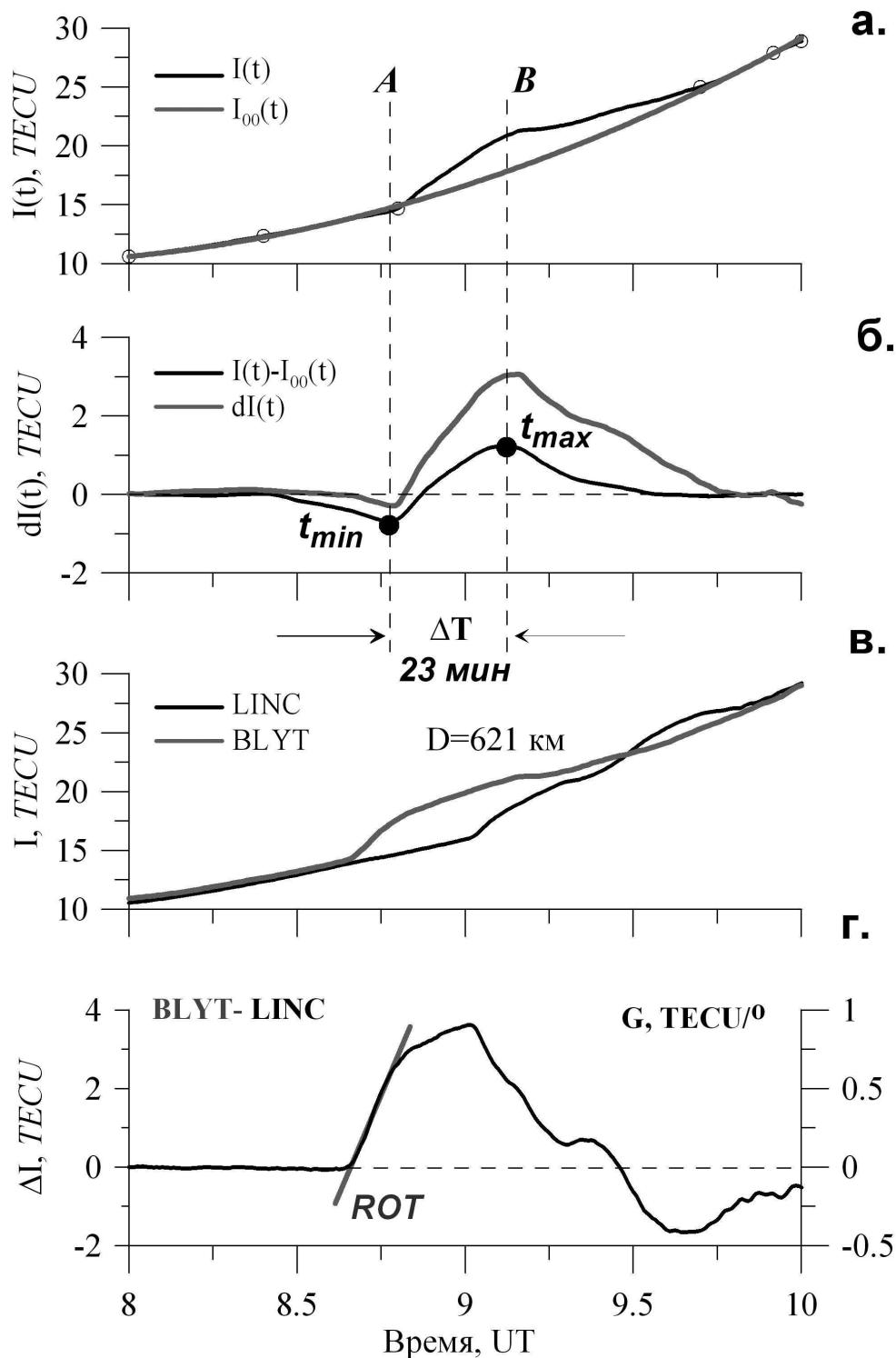


Рис. 3. Вариации ПЭС при сканировании магнитного зенита 5 октября 2001 по данным GPS станции AGMT, PRN 05 (след A): (а) – исходный ряд ПЭС (черная кривая) $I(t)$, аппроксимация невозмущенного ПЭС $I_{00}(t)$ (серая толстая кривая проведенная через окружности); (б) – Вариации ПЭС $dI(t)$ отфильтрованные в диапазоне периодов 2-60 мин (черная кривая); разность между исходным рядом ПЭС и невозмущенным приближением $dI(t)_{00}=I(t)-I(t)_{00}$ (толстая серая кривая). t_{min} и t_{max} отмечают минимум и максимум отклонения ПЭС при прохождении МОН относительно фонового значения. (в) – исходные ряды ПЭС I_1 и I_2 для двух разнесенных станций GPS 1 (LINC) и 2 (BLIT) с длиной базы $D=621$ км 5 октября 2001 г. (г) – разность рядов ПЭС, представленных на панели (в) $\Delta I=I_1-I_2$ (толстая черная линия). Шкала для соответствующих вариаций градиента ПЭС представлена справа. Наклонная серая линия отмечает область резкой границы временной зависимости ΔI со значительным наклоном ROT .

Наиболее вероятное значение угла γ между векторами \vec{B} и \vec{r} для максимальной амплитуды ИИВ представлено в строке 9. Максимальная амплитуда регистрируется при минимальном γ . Это соотносится с моделью неоднородности, вытянутой по магнитному полю и мы можем интерпретировать регистрируемое ИИВ как блоб. Поперечный размер неоднородности D_- составляет ~ 70 км (строка 10). Таким образом, поперечный размер МОН в вертикальной плоскости существенно меньше его горизонтального размера.

Таблица 1. Средние параметры магнитоориентированных неоднородностей и их возможного влияния на работу радиоинтерферометров 5 октября 2001 г.

<i>№</i>	<i>«След» Название</i>	A	B	C	D				
1	PRN	5	30	6	3				
2	ΔT , мин.	23	19	18	11				
3	$dI(t)_{00}$, TECU	3.06	2.8	2.6	2.1				
4	$\Delta I/I_0, \%$	17	19	21	8				
5	M	660	280	376	280				
6	V, м/с	171	184	158	73				
7	$\langle a \rangle, ^\circ$	0	5	5	0				
8	$\langle \theta \rangle, ^\circ$	22	27	24	20				
9	$\gamma, ^\circ$	6	13	22	36				
10	D_- , км	70	66	71	23				
11	Станции	LINC	BLYT	DIAB	BLYT	BEAT	AZRY	ВКАР	BBDM
12	Широта, $^\circ$	37.64	33.61	37.88	33.61	37.04	33.54	35.29	34.58
13	Долгота, $^\circ$	240.98	245.28	238.08	245.28	243.38	243.37	243.92	240.02
14	d, км	620.82		842.16		407.49		381.27	
15	ΔI_{max} , TECU	3.62		3.59		3.3		2.25	
16	$\Delta \phi$, рад.	305.5		303		278.5		190	
17	G, TECU/ $^\circ$	0.89		0.84		0.94		3.16	
18	dI/dr (max), TECU/1000 км	5.83		4.26		8.1		5.9	
19	Угловая ошибка (max), угл. мин.	0.8		0.6		1.12		0.82	
20	ROT, TECU/мин	0.33		0.37		0.37		0.4	
21	f_D , мГц	73		82.5		82.5		89	

Влияние МОН на радиоинтерферометры и дифференциальные системы GPS

Градиенты ПЭС при пересечении МОН могут достигать больших значений (до 10 TECU/1000 км). Такие градиенты обуславливают большие кратковременные ошиб-

ки определения дальности в одночастотных дифференциальных GPS системах [8] в тех случаях, когда линия зрения проходит вблизи магнитного зенита. Дополнительное ПЭС 1 ТЕСУ приводит к ошибкам по дальности ~ 0.2 м. Кроме того, такие градиенты приводят к рефракционной погрешности интерферометров со сверхдлинной базой (VLBI) [9].

Влияние ионосферы приводит к более серьезным ошибкам по сравнению с собственной точностью VLBI. Это особенно важно для высокоточных систем, таких как система LOFAR (30-240 MHz, <http://www.lofar.org/>), строящаяся в Нидерландах и состоящая из 25000 приемных диполей распределенных по территории с диаметром ~ 350 км. Однако в современной радиоастрономии направление, связанное с учетом влияния ионосферы, должного развития не получило.

Для каждого «следа» МОН мы выбрали 2 GPS станции (координаты станций и расстояние между ними указано в строках 12-14 Таблицы 1) и сделали расчет вариаций параметров радиосигнала частоты 100 МГц аналогично [9]. ПЭС, полученное по данным этих станций, для треков **A**, **B**, **C**, **D** (Рис. 2д) приведено на рис. 4, панели а, б, в, г, соответственно. Тонкой сплошной кривой приведена динамика ПЭС для более северной станции, пунктирной кривой – для более южной. Жирная черная кривая – разность ПЭС северной и ПЭС южной станции. Соответствующая ей величина градиента ПЭС в сторону северной станции отмечена на внутренней левой шкале. На внешней правой шкале отмечена разность фаз южной и северной станции.

Вариация разности ПЭС от момента прихода спайка на южную до прихода спайка на северную станцию ΔI_{\max} составляет 2-4 ТЕСУ (строка 15 таблицы 1). Соответствующая ей разность фаз приведена в строке 16 таблицы 1. Неучет 4 ТЕСУ в дифференциальных системах навигации приведет к ошибке определения координат ~ 1 м. Эта величина вполне сравнима с точностью современных дифференциальных систем и превосходит требования к точности разрабатываемых систем.

Вариация градиента ПЭС вдоль меридиана при прохождении спайка от северной до южной станции достигает 1 ТЕСУ/ $^{\circ}$, а общий градиент составляет $\sim 4-8$ ТЕСУ/1000 км (строка 18 таблицы 1). В результате такого изменения градиента кажущееся угловое местоположение исследуемого источника при радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой изменится на величину $\sim 1'$ (строка 19 таблицы 1). В то же время, угловое разрешение сверхточных VLBI систем может достигать нескольких угловых секунд. Например, угловое разрешение LOFAR для частоты $f=120$ МГц и $d=100$ км составляет $6.3''$ [10]. Таким образом, ионосфера приводит к значительно более существенным ошибкам по сравнению с потенциальным разрешением VLBI.

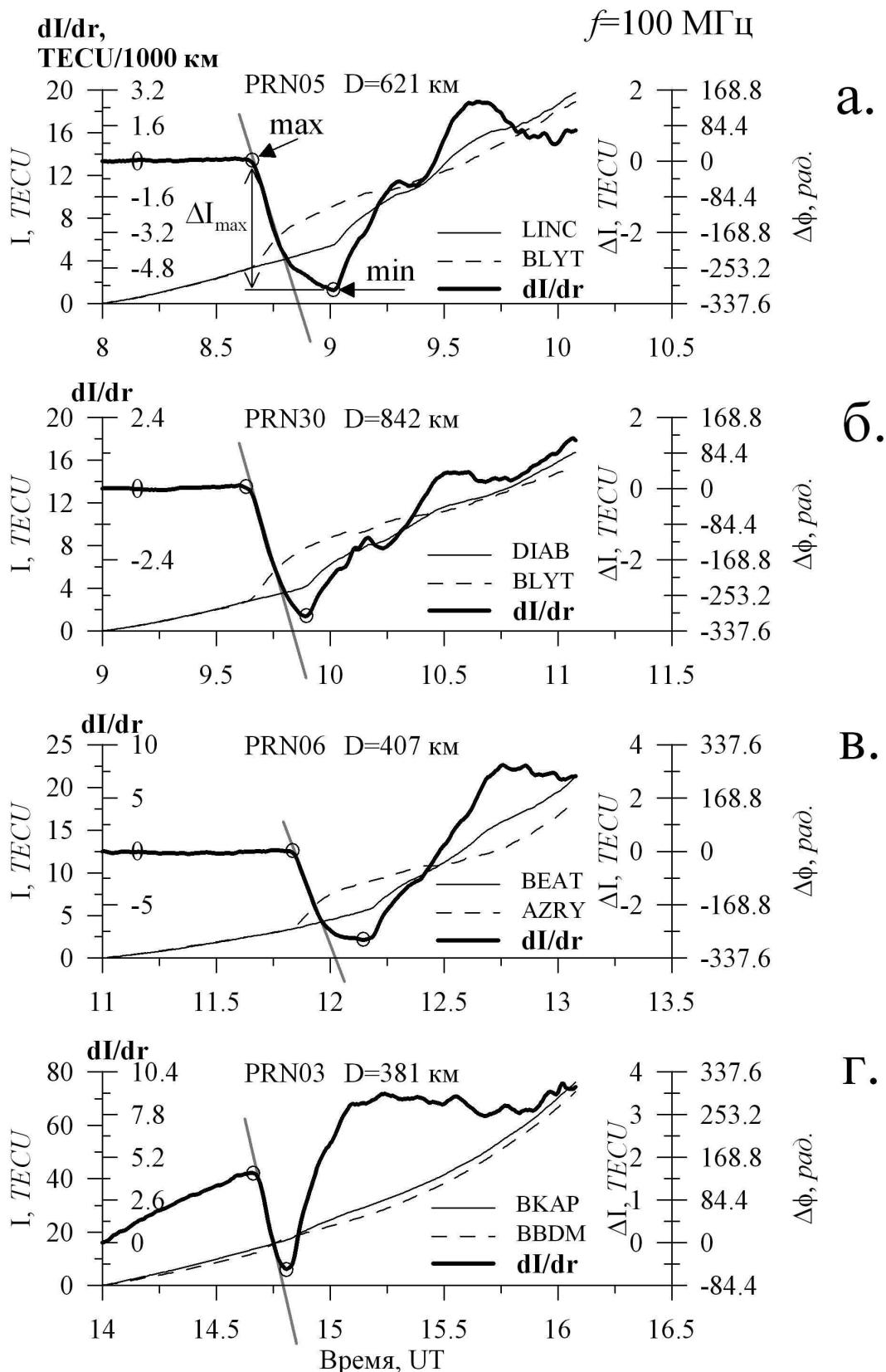


Рис. 4. Градиенты ПЭС (черные линии) между двумя разнесенными станциями GPS во время сканирования магнитного зенита 5 октября 2001 над Калифорнией для следов **A**, **B**, **C** и **D** (а, б, в, г). Длина базы равна $d=621$ км, 842 км, 407 км, 381 км, соответственно. Исходные ряды ПЭС для разнесенных станций представлены тонкими линиями. Шкала разности ПЭС и соответствующих изменений разности фаз $\Delta\phi$ для частоты 100 МГц представлена справа. Толстая серая кривая отмечает максимальную временную производную разности фаз. Окружности отмечают время появления МОН в области южной и северной станции

Серой кривой на панелях рис. 4 отмечено наиболее сильное изменение разницы ПЭС на двух станциях. Его величина составляет $\sim 0.3\text{--}0.4$ TECU/мин. (строка 20 таблицы 1). Расхождение частот регистрируемого сигнала на двух станциях, обусловленное изменением ПЭС, указано в строке 21 таблицы 1. Его величина на порядок превышает регулярный эффект, обусловленный суточным изменением ПЭС [7].

При интерпретации данных VLBI подобные эффекты могут быть связаны с процессами, происходящими в исследуемом объекте. Тем не менее, в данном случае это связано с ионосферой. Вот почему для регистрируемого посредством VLBI излучения необходимо делать поправку на ионосферные эффекты и особенно эффекты МОН.

Заключение и обсуждение

На протяжении последних тридцати лет большое число различных видов структур в ночном F-слое были исследованы с использованием различных инструментов. Так как данные структуры характеризуются резкими градиентами, а также мелкомасштабными структурами электронной плотности, то они могут служить угрозой для систем связи и навигации, основанных на трансионосферном распространении радиосигнала.

В данной работе предложен новый метод детектирования среднеширотных МОН. Метод основан на сканировании области магнитного зенита лучами GPS. Возможность метода продемонстрирована на примере регистрации необычных среднеширотных ИИВ над Калифорнией 5 октября 2001 г. [6]. В данном случае плазменные блобы с положительным отклонением относительно фонового ПЭС регистрируются на 43° MLAT, что соответствует высоте ~ 6000 км над магнитным экватором в апексе.

Основная проблема связана с отличием направления перемещения неоднородностей полученным нами (северное) от обычного направления перемещения МОН (восточное). Мы можем предположить, что наблюдаемый в рассматриваемом нами случае блоб поднимается до очень большой высоты над магнитным экватором. Поэтому мы будем видеть только движение на север, характеризующее «всплытие» блоба. Таким образом, то направление, которое видим мы и то, что наблюдали в [5] – несколько разные вещи.

Когда неоднородность вытянута вдоль магнитного поля и поднимается над экватором, волновой фронт возмущения должен быть перпендикулярен магнитной силовой линии. Наклонение магнитного поля для точки 243 E, 36 N составляет $\sim 61^\circ$. Тогда угол места нормали магнитной силовой линии составляет $\sim 29^\circ$. Ранее мы установили, что угол места волнового вектора \vec{K} имеет значение $\sim 22\text{--}24^\circ$. Это является дополнительным свидетельством, что наблюдаемое возмущение представляет собой проявление МОН.

Резкие градиенты ПЭС, обусловленные МОН, могут увеличить дифференциальную ошибку между наземной базовой станцией и бортовым приемником. Подобные проблемы могут возникнуть при работе VLBI. В этом случае эффекты МОН приведут к различному фазовому запаздыванию и нарушению когерентности интерференционной картины.

В работе [11] впервые был обнаружен квазистационарный эффект магнитного зе-нита, который приводит к уменьшению электронной концентрации и формированию не-однородностей электронной концентрации, простирающихся вдоль линии магнитного по-ля, вследствие влияния мощного высокочастотного излучения. Однако крайне важно сравнить эти результаты со статистикой естественных МОН.

Благодарности

Авторы благодарят Потехина А.П. и Медведева А.В. за интерес к работе. Мы вы-ражаем благодарность научным группам SOPAC и CORS за данные GPS. Работа поддер-жана Фундаментальной исследовательской программой физического отделения РАН (Проект IV.12 “Современные проблемы радиофизики”), грантом РФФИ 10-05-00113-а.

Литература

1. *Ma G., Maruyama T.* A super bubble detected by dense GPS network at east Asian longi-tudes // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. L21103.
2. *Huang C.-S., Foster J.C., Sahai Y.* Significant depletions of the ionospheric plasma density at middle latitudes: A possible signature of equatorial spread F bubbles near the plasma-pause // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. A05315.
3. *Hysell D.L.* An overview and synthesis of plasma irregularities in equatorial spread F // J. Atmos. Solar Terr. Phys. 2000. V. 62. P. 1037–1056.
4. *Yokoyama T. Su S.-Yi, Fukao S.* Plasma blobs and irregularities concurrently observed by ROCSAT-1 and Equatorial Atmosphere Radar // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. A05311.
5. *Kintner P. M., Ledvina B. M., de Paula E. R., Kantor I. J.* Size, shape, orientation, speed, and duration of GPS equatorial anomaly scintillations // Radio Sci. 2004. V. 39. RS2012.
6. *Afraimovich E.L., Astafieva E.I., Voyeikov S.V.* Isolated ionospheric disturbances as deduced from global GPS network // Ann. Geophys. 2004. V. 22, N 1. P. 47-62.
7. *Афраимович Э.Л., Перевалова Н.П.* GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли // Ир-кутск: Изд-во ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАН, 2006. 480 с.
8. *Monteiro L.S., Moore T., Hill C.* What is the accuracy of DGPS? // Journal of Navigation. 2005. V. 58, N 2. P. 207-225.

9. *Afraimovich E.L., Yasukevich Yu.V.* Using GPS-GLONASS-GALILEO data and IRI modeling for ionospheric calibration of radio telescopes and radio interferometers // J. Atm. Solar-Terr. Phys. 2008. V. 70, N 15. P. 1949-1962.
10. *Rottgering H.J.A., Braun R., Barthel P.D., van Haarlem M.P., Miley G.K., Morganti R., Snellen I.* LOFAR - Opening up a new window on the Universe // Cosmology, galaxy formation and astroparticle physics on the pathway to the SKA, Oxford, UK, 2006.
11. *Терещенко Е.Д., Миличенко А.Н., Фролов В.Л., Юрик Р.Ю.* Наблюдение эффекта магнитного зенита с использованием сигналов спутников GPS/ГЛОНАСС // Известия ВУЗов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 11. С. 934-938.

Mid-latitude field-aligned ionospheric plasma disturbances and its impact on differential navigation systems DGPS and very long base interferometers

E.L. Afraimovich [†], E.I. Astafyeva, A.B. Ishin, E.A. Kosogorov, Yu.V. Yasukevich

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS
Irkutsk, Russian Federation, 126a, Lermontov street, 664033, P.O. Box 291*

*E-mails: afrapub@iszf.irk.ru; ellienda@iszf.irk.ru; ishin@iszf.irk.ru;
e.kosogorov@orange-ftgroup.ru; yasukevich@iszf.irk.ru;*

Using technique of magnetic zenith scanning by GPS rays it was shown that unusual northward isolated ionosphere irregularities registered on 5th October 2001 above California are manifestation of field-angled plasma disturbances (FAD). FADs are characterized by positive deviation of the total electron content (TEC) value up to 4 TECU (10^{16} el/m²). Corresponding TEC variations are isolated impulses with duration of ~40 min. We estimate the influence of such irregularities on differential GPS. Some problems connected with radio signal parameters change may arise when up-to-date very long base interferometers operate, for example, LOFAR or SKA. For case under study we analyzed corresponding errors of phase, Doppler frequency shift and angular error at 100 MHz.

Keywords: GPS, blobs, ionosphere, field-angled disturbances