

## ОТКЛИК ИОНОСФЕРЫ НА ГЕОМАГНИТНУЮ БУРЮ 2 МАЯ 2010 г. И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ КВ-РАДИОВОЛН В ВЫСОКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЕ

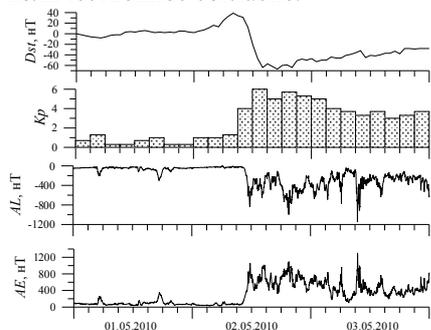
Д.С. Котова<sup>1</sup>, М.В. Клименко<sup>2</sup>, В.В. Клименко<sup>2</sup>, В.Е. Захаров<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград, e-mail: darshu@yandex.ru

<sup>2</sup>Западное отделение ИЗМИРАН им. Н.В. Пушкова, Калининград, Россия,  
e-mail: maksim.klimenko@mail.ru

### Введение

Ранее в работах (Клименко и др., 2011а,б; Klimenko et al., 2011а,б; Sahai et al., 2011; Klimenko et al., 2012) были представлены результаты численных расчетов ионосферных эффектов геомагнитных бурь в 2000–2011 гг., полученные при различных постановках задачи с использованием Глобальной Самосогласованной Модели Термосферы, Ионосферы и Протоносферы (ГСМ ТИП) (Namgaladze et al., 1988; Клименко и др., 2006), разработанной в ЗО ИЗМИРАН. В этих работах проведено сравнение полученных результатов с данными наблюдений в высоко-, средне- и низкоширотной и экваториальной ионосфере и рассмотрены механизмы формирования ионосферных возмущений. Сравнение результатов модельных расчетов различных ионосферных параметров с данными наблюдений выявило качественное, а иногда и количественное согласие.



**Рис. 1** Поведение индексов геомагнитной активности  $Dst$ ,  $Kp$ ,  $AL$  и  $AE$  в период 1–3 мая 2010 г.

В данном исследовании мы воспользовались результатами модельных расчетов отклика ионосферы на геомагнитную бурю 2–3 мая 2010 г. в постановке задачи, описанной в работе (Klimenko et al., 2012), с использованием модели ГСМ ТИП при различном задании входных параметров модели. На рис. 1 показана геомагнитная обстановка за рассматриваемый период. Видно, что буря началась 2 мая с SSC в ~09:00 UT. Затем последовали главная фаза бури, достигшая своего максимума в 15:00 UT, и фаза восстановления.

### Постановка задачи и описание параметров среды

В исследованиях, результаты которых представлены в данной работе, использовалась модель распространения радиоволн, разработанная в БФУ им. И. Канта (Захаров и Черняк, 2007), и модель среды ГСМ ТИП. Ранее была проведена работа по адаптации этих двух моделей (Котова и др., 2013). Расчеты КВ радиотрасс проводились по схеме, показанной на рис. 2.

На рис. 3 представлены долготно-широтные распределения критической частоты  $foF2$  и высоты максимума  $F2$ -слоя  $h_mF2$  в спокойных условиях 1 мая, а также возмущения этих параметров в главную (2 мая) и восстановительную (3 мая) фазы бури, рассчитанные для 15:00 UT в модели ГСМ ТИП. Хорошо видны такие крупномасштабные пространственные неоднородности  $F$  области ионосферы, как главный ионосферный провал и экваториальная аномалия. Рассмотрим механизмы формирования положительных и отрицательных возмущений параметров максимума  $F2$  слоя 2 мая. Для этого нам понадобятся карты возмущений меридиональной компоненты скорости термосферного ветра и состава нейтральной атмосферы в виде отношения концентрации атомарного кислорода  $n(O)$  к концентрации молекулярного азота  $n(N_2)$ , показанные на рис. 4. Вариации  $h_mF2$  связаны прежде всего с вариациями скорости термосферного ветра, положительные эффекты  $foF2$  вызываются ветром, а отрицательные – изменениями состава.

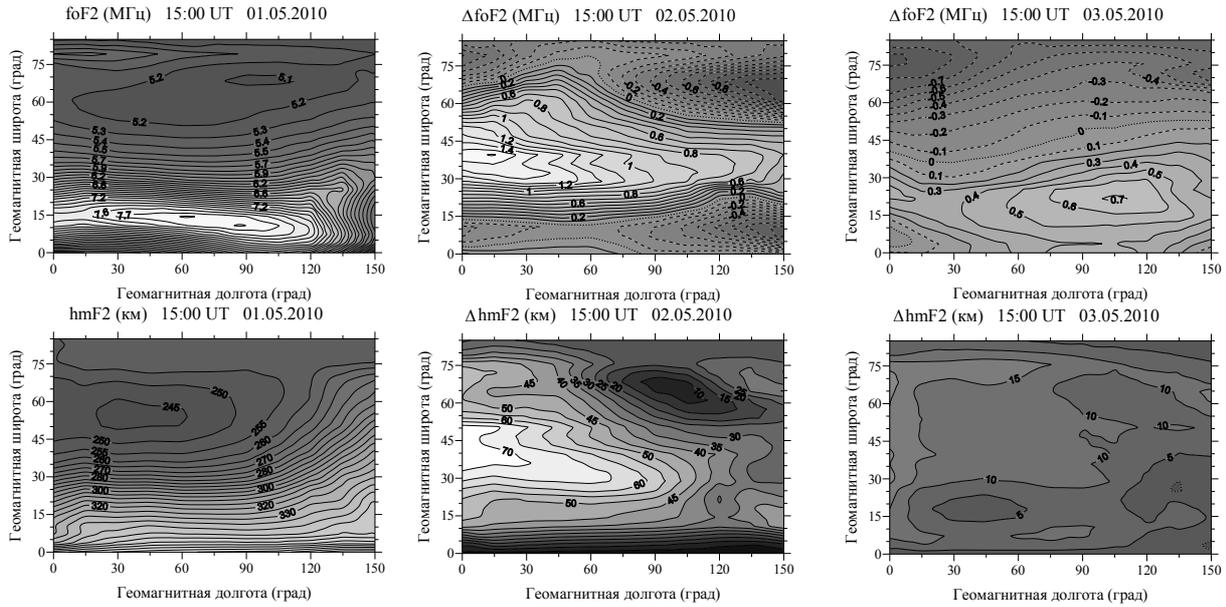
### Схема исследования



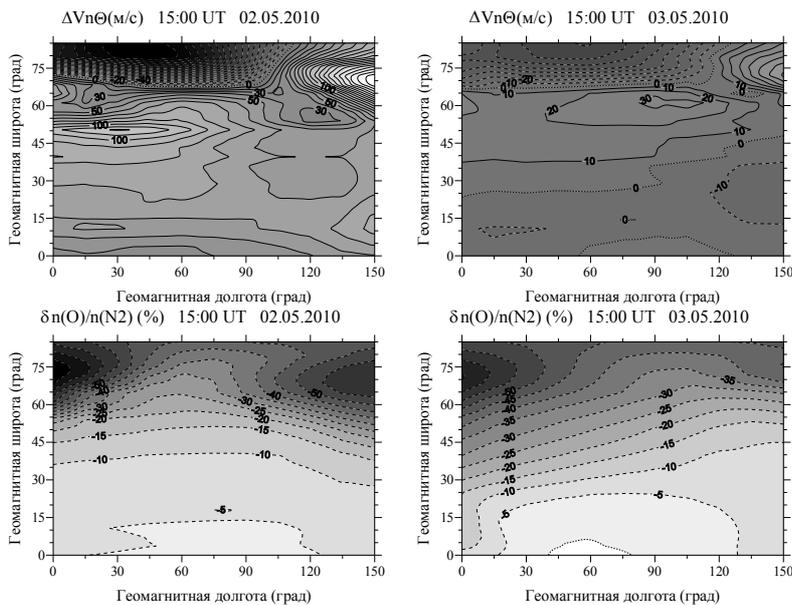
**Рис. 2** Схема исследования

Несмотря на изменения состава нейтральной атмосферы (уменьшение отношения  $n(O)$  к  $n(N_2)$ ), которое приводит к уменьшению  $foF2$  порядка 40% в высоких широтах, появление дополнительного ветра к экватору приводит к положительному эффекту в  $foF2$  на средних широтах. Максимум возмущения ветра приходится на высокие широты, а максимум положительного возмущения  $foF2$  порядка 20% – на средние широты. Смещение максимума положительных возмущений  $foF2$  к средним широтам связано с тем, что силовые линии геомагнитного поля в высоких широтах близки к вертикальным. Поэтому в  $F$  области высокоширотной ионосферы влияние термосферного ветра на

перенос плазмы минимальное. При удалении от полюса к средним широтам это влияние усиливается по мере уменьшения угла наклона магнитного поля.



**Рис. 3** Долготно-широтные распределения  $foF2$  и  $hmF2$  в спокойных условиях 1 мая (слева), а также возмущения этих параметров в главную (2 мая) и восстановительную (3 мая) фазы бури (посередине и справа, соответственно), рассчитанные для 15:00 UT в модели ГСМ ТИП.



**Рис. 4** Возмущения меридиональной компоненты скорости термосферного ветра и состава нейтральной атмосферы 2 мая (слева) и 3 мая (справа).

долгота, с азимутом передающей антенны  $\beta = 90^\circ$ ; 2.  $\varphi = 72.6^\circ N$ ,  $\lambda = 68.1^\circ W$ ,  $\Phi = 84^\circ$ ,  $A = 5^\circ$ , с азимутом передающей антенны  $\beta = 180^\circ$ .

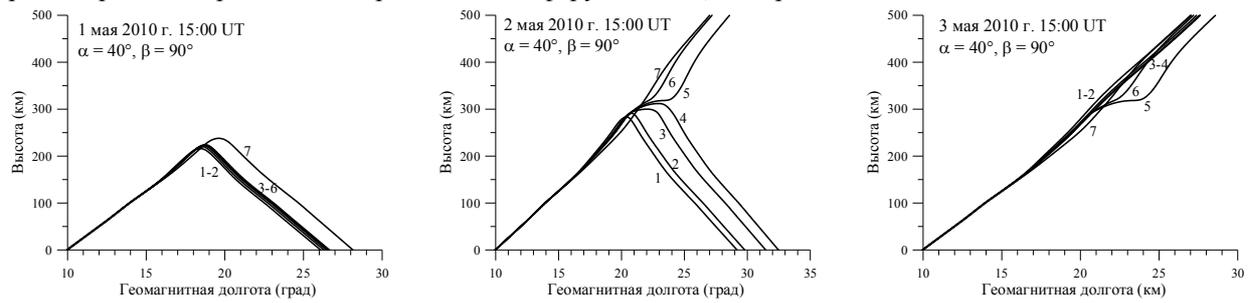
На рис. 5 показаны результаты модельных расчетов распространения КВ радиоволн с различными частотами от первой передающей станции, излучающей радиоволны в зональном направлении с запада на восток с углом места передающей антенны  $\alpha = 40^\circ$  в координатах геомагнитная долгота-высота. Видно, насколько сильно отличаются радиотрассы в спокойных условиях от радиотрасс во время бури. Так, в спокойных условиях происходит отражение всех радиоволн в рассматриваемом диапазоне частот на высотах  $F2$  области ионосферы. В активную фазу бури часть радиоволн также отражается от  $F2$  области ионосферы, но отражение происходит на больших высотах, что связано с падением электронной концентрации. При этом радиоволны распространяются на большее расстояние, чем в спокойных условиях. Оставшаяся часть излучаемых радиоволн не отражается от ионосферы, а проходит ее насквозь. Наконец, в

Возмущения меридиональной компоненты скорости термосферного ветра и состава нейтральной атмосферы 3 мая меньше, чем 2 мая, поэтому и ионосферные возмущения меньше (рост  $foF2$  порядка 10% на средних и низких широтах). При этом преобладают отрицательные эффекты  $foF2$  (до 40% в высоких широтах).

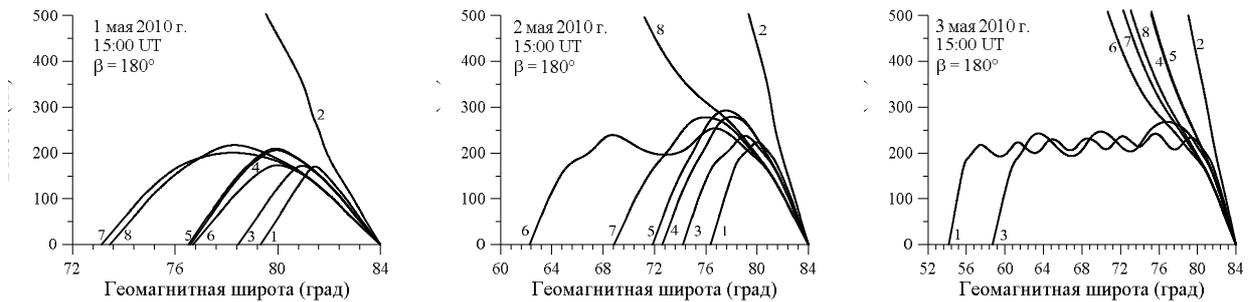
### Результаты расчетов КВ радиотрасс

В данной работе представлены результаты расчетов КВ радиотрасс для двух гипотетических передающих радиостанций, расположенных на поверхности Земли: 1.  $\varphi = 63.7^\circ N$ ,  $\lambda = 64^\circ W$ ,  $\Phi = 75^\circ$ ,  $A = 10^\circ$ , где  $\varphi$  и  $\lambda$  – географические широта и долгота,  $\Phi$  и  $A$  – геомагнитные широта и

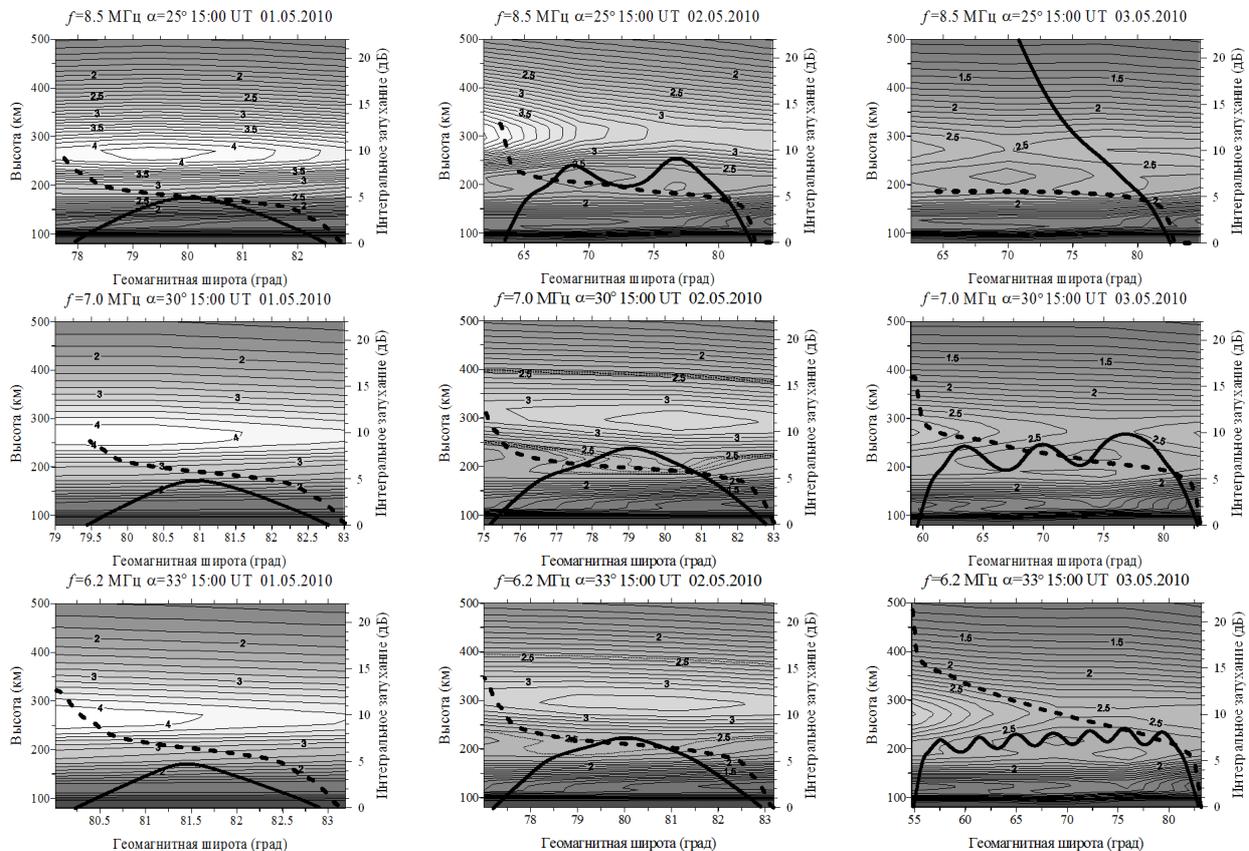
фазу восстановления плотность электронов в ионосфере сильно падает, что приводит к тому, что все рассматриваемые радиоволны проходят ионосферу насквозь, не отражаясь от нее.



**Рис. 5** Рассчитанные КВ радиотрассы с различными частотами от 1-ой гипотетической передающей радиостанции для условий 1 – 3 мая 2010 г. 15:00 UT,  $\alpha = 40^\circ$ ,  $\beta = 90^\circ$ ,  $\varphi = 63.7^\circ N$ ,  $\lambda = 64^\circ W$ : 1 – 6.00 МГц, 2 – 6.10 МГц, 3 – 6.15 МГц, 4 – 6.17 МГц, 5 – 6.18 МГц, 6 – 6.20 МГц, 7 – 6.50 МГц.



**Рис. 6** Рассчитанные КВ радиотрассы с различными частотами от 1-ой гипотетической передающей радиостанции для условий 1 – 3 мая 2010 г. 15:00 UT,  $\beta = 180^\circ$ ,  $\varphi = 72.6^\circ N$ ,  $\lambda = 68.1^\circ W$ : 1 – 6.20 МГц,  $\alpha = 33^\circ$ ; 2 – 6.40 МГц,  $\alpha = 40^\circ$ ; 3 – 7.00 МГц,  $\alpha = 30^\circ$ ; 4 – 7.70 МГц,  $\alpha = 30^\circ$ ; 5 – 7.80 МГц,  $\alpha = 30^\circ$ ; 6 – 8.50 МГц,  $\alpha = 25^\circ$ ; 7 – 9.00 МГц,  $\alpha = 25^\circ$ ; 8 – 9.50 МГц,  $\alpha = 25^\circ$ .



**Рис. 7** Рассчитанные трассы (сплошные полужирные линии) и интегральные затухания (штриховые полужирные линии) радиоволн с различными частотами и углами места  $\alpha$  передающей антенны 2-ой радиостанции на фоне изолиний электронной концентрации ( $10^5 \text{ см}^{-3}$ ) вдоль трасс.

На рис. 6 показаны аналогичные наиболее интересные случаи из всех рассчитанных результатов расчетов КВ радиотрасс от второй передающей станции, излучающей радиоволны в меридиональном направлении от полюса к экватору при заданных параметрах передающей антенны в координатах геомагнитная широта-высота. Излучение радиоволн происходит не только с различными частотами, но и под различными углами места  $\alpha$  передающей антенны. Видно, что в спокойных условиях происходит отражение всех излучаемых радиоволн, кроме одной. В активную фазу бури число радиотрасс, отраженных от ионосферы, становится на одну меньше. При этом значительно увеличивается дальность распространения радиоволн и появляется трасса, осциллирующая в области ионосферной долины между слоями  $F1$  и  $F2$ . Отразившись от  $F2$  слоя вниз, волна доходит до  $F1$  слоя, отражается от него вверх, и, дойдя до  $F2$  слоя, отражается от него и уходит к Земле. Для того, чтобы понять поведение наиболее интересных радиотрасс, на рис. 7 они показаны на фоне изолиний электронной концентрации, построенных вдоль трассы распространения. Еще более интересные результаты мы получили на фазе восстановления бури. Видно, что из всех рассмотренных радиоволн остаются лишь две, которые не проходят ионосферу насквозь. Эти две трассы имеют наибольшую протяженность и имеют осциллирующий вид. Можно заметить, что область осцилляции в этом случае также находится в области долины между слоями  $F1$  и  $F2$ , но несколько ниже, чем в активную фазу бури.

На рис. 7 показаны трассы и интегральные затухания радиоволн с различными частотами и углами места  $\alpha$  передающей антенны 2-ой радиостанции на фоне изолиний электронной концентрации вдоль трасс. Для радиоволны с частотой 8.5 МГц и  $\alpha = 25^\circ$  хорошо видно влияние пространственных неоднородностей электронной плотности на характер ее распространения. Высокая плотность ионосферной плазмы в спокойных условиях 1 мая приводит к тому, что отражение к Земле рассматриваемых радиоволн происходит на высотах нижней части  $F2$  области ионосферы. Понижение плотности плазмы 2 мая и наличие неоднородностей в ее распределении вдоль трассы приводят к осциллирующему виду трассы. Значительное падение плотности плазмы 3 мая приводит к тому, что радиоволна проходит ионосферу насквозь, испытывая преломление, но не отражаясь от ионосферы. Аналогичным образом представлены трассы радиоволн с частотой 6.2 МГц и  $\alpha = 33^\circ$  и с частотой 7.0 МГц и  $\alpha = 30^\circ$ .

## Заключение

В настоящей работе при моделировании распространения КВ радиоволн использовалась глобальная трехмерная теоретическая модель системы термосфера-ионосфера GSM ТИП для описания неоднородной анизотропной среды. Показано, что совместное использование модели распространения радиоволн и GSM ТИП адекватно описывает КВ радиотрассы в ионосфере Земли. Рассмотрены особенности формирования радиотрасс в условиях геомагнитной бури 1–3 мая 2010 г. для высокоширотной области ионосферы и показано, что изменения параметров  $F$  области высокоширотной ионосферы приводят к изменению характера распространения радиоволн. В главную фазу бури происходит рост  $foF2$  порядка 20% на средних широтах и ее падение в высоких широтах порядка 40%. В восстановительную фазу бури происходит рост  $foF2$  порядка 10% на более низких широтах и ее падение в высоких широтах порядка 40%.

## Список литературы

- Захаров В.Е., Черняк А.А. (2007). Численная модель распространения радиотрасс коротких радиоволн в ионосфере, *Вестник РГУ им. И. Канта*, Калининград, Вып. 3, 36–40.
- Клименко М.В. и др. (2006). Численное моделирование электрического поля и зонального тока в ионосфере Земли – Динамо поле и экваториальный электроджет, *Геомагнетизм и аэронавигация*, **46**(4), 485–494.
- Клименко М.В. и др. (2011а), Ионосферные возмущения во время геомагнитных бурь в сентябре 2005 года и декабре 2006 года, *Proceedings of the 34<sup>th</sup> Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”*, Apatity, 1 – 4 March, 2011. Apatuty, 2011, 162–165.
- Клименко М.В. и др. (2011б). Ионосферные эффекты последовательности геомагнитных бурь 9–14 сентября 2005 г., *Геомагнетизм и аэронавигация*, **51**(3), 368–380.
- Котова Д.С. и др. (2013). *Вестник БФУ им. И. Канта, Серия «Физико-математические науки»*, Калининград, Вып. 10 (в печати).
- Klimentko M.V. et al. (2011a). Disturbances in the ionospheric F-region peak heights in the American longitudinal sector during geomagnetic storms of September 2005, *Advances in Space Research*, **48**(7), 1184–1195, doi:10.1016/j.asr.2011.06.002.
- Klimentko M.V. et al. (2011b). Numerical modeling of ionospheric effects in the middle- and low-latitude  $F$  region during geomagnetic storm sequence of 9–14 September 2005, *Radio Sci.*, **46**, RS0D03, doi:10.1029/2010 RS004 590.
- Klimentko M.V. et al. (2012). Various Magnetospheric Inputs to the GSM TIP Model for Investigation of Ionospheric Response to Geomagnetic Storm Event on 2–3 May 2010, *Proceedings of the 35th Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”*, Apatity, 28 February – 2 March, 2011. Apatuty: KSC RAS, 111–114.
- Namgaladze A.A. et al. (1988). Global Model of the Thermosphere–Ionosphere–Protonosphere System, *PAGEOPH*, **127**(2/3), 219–254.
- Sahai Y. Et al. (2011), Effects of geomagnetic super storms on the ionospheric F-region in the South American sector using a GPS technique: A review, *Asian Journal of Physics*, **20**(4), 1–20.