

А.Г. Ким, В.П. Грозов, К.Г. Ратовский, А.В. Медведев, А.П. Потехин,
Б.Г. Шпынев

Особенности поведения параметров F-слоя ионосферы в Иркутске во время магнитной бури 29–31.10.2003 г.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск

Поступила в редакцию 12.11.2004 г.

Мощная магнитная буря 29–31.10.2003 г. была суперпозицией двух больших магнитных бурь от солнечных вспышек 28.10 (X17.02) и 29.10 (X10.00). Ионосферный отклик на магнитную бурю в Иркутске исследовался с помощью дигизонда DPS-4, ЛЧМ-ионозонда и радара некогерентного рассеяния.

Основное внимание уделено анализу расхождения данных, полученных на трех разных установках. Общие закономерности ионосферного отклика совпадают для всех трех инструментов. Заметные различия наблюдаются как на главных фазах обеих бурь, так и на фазе восстановления первой бури.

Различия на фазе восстановления объясняются разным географическим положением инструментов: средняя точка трассы ЛЧМ-ионозонда удалена от иркутского дигизонда DPS-4 на 100 км в западном направлении и почти совпадает с местом положения основного лепестка диаграммы направленности радара некогерентного рассеяния. Расхождение в данных ЛЧМ-ионозонда и радара существенно меньше по сравнению с различиями от данных дигизонда. Это свидетельствует о наличии очень сильных градиентов электронной концентрации в восточно-западном направлении на фазе восстановления магнитной бури.

1. Описание инструментов

В конце 2002 г. ионосферные обсерватории ИСЗФ СО РАН (в Иркутске и Норильске) были оснащены дигизондами DPS-4, выпускаемыми Центром атмосферных исследований (Массачусетский университет Лоуэлла, США). Основное назначение DPS-4 – восстановление профиля электронной концентрации из ионограмм вертикального зондирования и измерение скоростей дрейфа ионосферных неоднородностей на основе доплеровских и угломестных измерений [1].

Передающий пункт ионозонда, использующего сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), находится вблизи г. Усолые-Сибирское примерно в 98 км северо-западнее г. Иркутска (52° с.ш., 104° в.д.), приемный пункт – вблизи п. Торы примерно в 95 км юго-западнее Иркутска. Основные характеристики инструмента описаны в работах [2, 3]. ЛЧМ-ионозонд предназначен для наклонного и возвратно-наклонного зондирования ионосферы, регистрации кругосветных сигналов и может использоваться для слабонаклонного зондирования (излучение в Усолые, прием в Торах, длина трассы около 120 км, средняя точка трассы – примерно в 76 км западнее Иркутска). В спокойных и слабо возмущенных условиях ионограммы слабонаклонного зондирования мало отличаются от ионограмм вертикального зондирования, полученных в Иркутске [4].

Иркутский радар некогерентного рассеяния (НР) входит в мировую сеть радаров НР, состоящую из 9 установок, каждая из которых является

уникальным научным инструментом. Основное назначение радара – это измерение электронной концентрации, электронной и ионной температур. Подробное описание радара можно найти в работе [5]. Отличительная особенность иркутского радара заключается в возможности измерения фарадеевского вращения плоскости поляризации, что позволяет, в отличие от большинства радаров НР, проводить абсолютные измерения электронной концентрации.

Взаимное расположение инструментов показано на рис. 1 (место передатчика ЛЧМ-ионозонда совпадает с местом радара НР).

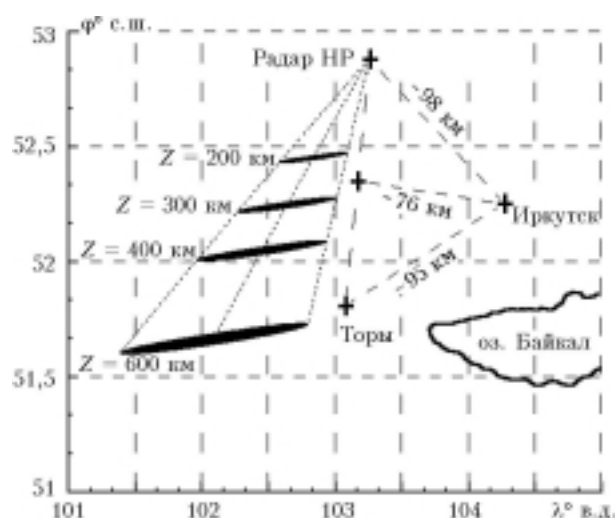


Рис. 1. Географическое расположение инструментов

Из рис. 1 видно, что средняя точка трассы ЛЧМ-ионозонда ближе к сектору обзора радаров НР, чем к Иркутску. Таким образом, исходя из географического положения, ожидается меньшее различие между ЛЧМ-ионозондом и радаром НР по сравнению с иркутским дигизондом DPS-4.

При сопоставлении результатов нужно учитывать не только взаимное расположение, но и информационные возможности инструментов при измерениях во время магнитной бури.

Основным недостатком ионозондов является отсутствие данных во время сильного поглощения в D -области, которое, как правило, сопровождается главной фазой сильной магнитной бури. Появление интенсивного спорадического слоя также приводит к потере данных об F -области. Радар НР малочувствителен к поглощению в D -области и появлению спорадического слоя, но обладает некоторыми недостатками. Из-за отражения от местных предметов минимальная высота для получения информации составляет 150 км. При малых значениях электронной концентрации во время главной фазы бури существенно ухудшается отношение сигнал-шум. Когерентные эхо, часто наблюдаемые в это же время [6], вносят в измерения дополнительные ошибки.

2. Результаты измерений

На рис. 2 изображены вариации Dst -индекса (связанного с развитием кольцевого тока в магнитосфере), полученные с сайта <http://swdcd.db.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir>. Видно, что буря 29–31.10 является суперпозицией двух бурь: первая 12 UT 29.10 – 06 UT 30.10, вторая 18 UT 30.10 – 06 UT 31.10.

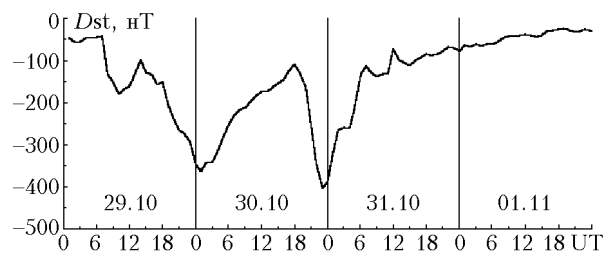


Рис. 2. Вариации Dst -индекса

На рис. 3 показан 4-суточный ход критической частоты f_0F2 и высоты максимума h_mF2 электронной концентрации (максимум электронной концентрации, полученный на радаре НР, пересчитан в критическую частоту).

Как видно из рис. 3, для всех инструментов имеются интервалы отсутствия данных. Данные дигизонда отсутствуют из-за поглощения, данные ЛЧМ-ионозонда – из-за позднего включения (29.10, 20:45 UT), поглощения и технических причин, данные радара НР – из-за позднего включения (29.10, 10:45 UT), технических причин и мощных когерентных эхо, приводящих к большим ошибкам измерения профиля электронной концентрации. В итоге полный набор данных был получен 30.10 (01–02 и 05–18 UT), 31.10 (07–09 UT) и 01.11. Наименьшие различия в данных наблюдаются в спокойный день 01.11 и в период между бурями 30.10 (09–15 UT). Наибольшие расхождения зарегистрированы во время фазы восстановления первой бури 30.10 (05–06 UT), этот случай будет подробнее рассмотрен в дальнейшем.

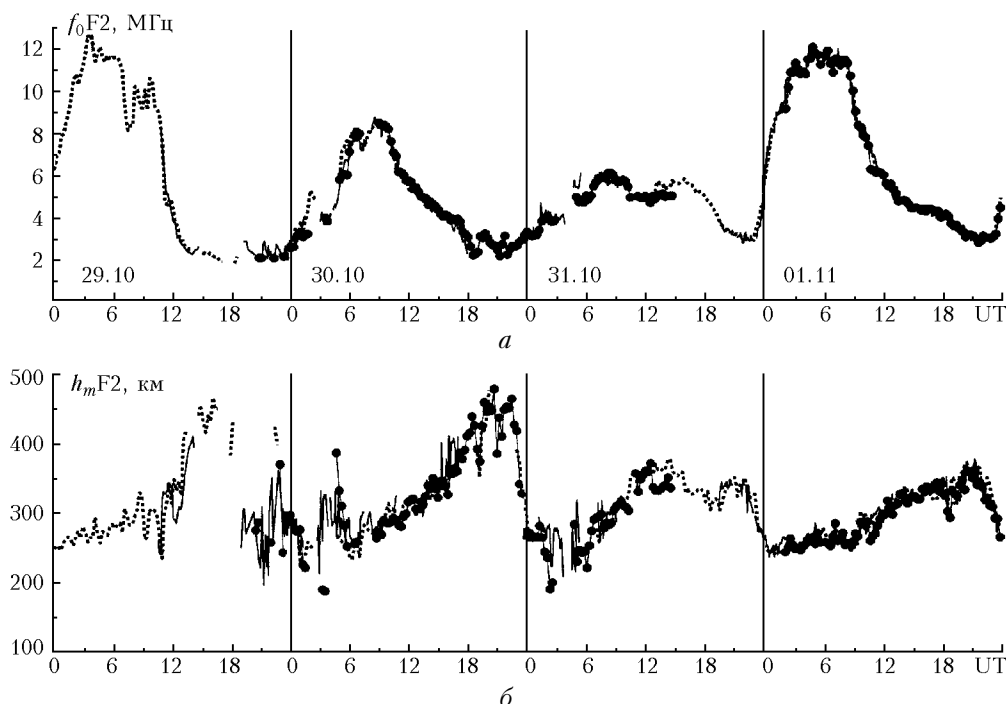


Рис. 3. Динамика критической частоты f_0F2 (а) и высоты максимума h_mF2 (б) во время магнитной бури 29.10–01.11.2003 г. Данные дигизонда DPS-4 – пунктирная линия, ЛЧМ-ионозонда – линия с кружками и радара НР – сплошная линия

Анализируя данные в целом, можно отметить, что различия в высоте максимума намного заметней, чем различия в критической частоте. Эти различия проявляются в виде быстрых шумоподобных вариаций высот максимума, полученных на радаре НР. Интервалы таких вариаций наблюдаются в главной фазе первой бури 29.10 (19–23 UT), на фазе восстановления первой бури 30.10 (03–06 UT), в начальной стадии второй бури 30.10 (15–18 UT) и на фазе восстановления второй бури 31.10 (01–05 UT). Возможной причиной этих вариаций является остаточное влияние когерентных эхо. Следует отметить хорошее согласование данных дигизонда и радара НР в начальной стадии первой бури 29.10 (11–15 UT), а также данных дигизонда и ЛЧМ-ионозонда в главной фазе второй бури 30.10 (18–21 UT).

С точки зрения сравнения данных представляет интерес период фазы восстановления первой бури, когда наблюдались наиболее сильные различия в критической частоте между тремя инструментами. На рис. 4 показаны вариации f_0F2 и h_mF2 на интервале с 0 до 10 UT 30.10.

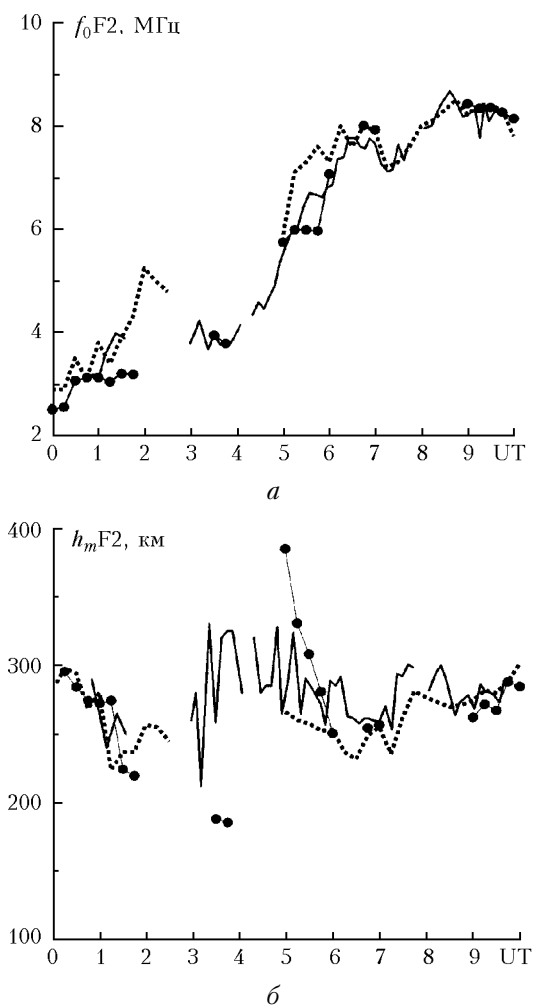


Рис. 4. Динамика f_0F2 (а) и h_mF2 (б) 30.10.2003 с 0 до 10 UT (обозначения см. рис. 3)

Фаза восстановления бури характеризуется не-монотонным ростом критической частоты с локальным максимумом около 02 UT (по данным дигизонда) и локальным минимумом около 04 UT (по данным ЛЧМ-ионозонда и радара НР). Монотонный рост критической частоты начинается с 04 UT (по данным радара НР). Данные обоих ионозондов появляются с 05 UT, при этом динамика роста f_0F2 дигизонда существенно отличается от динамики ЛЧМ-ионозонда. С 06 UT инструменты дают близкие между собой значения, а после 09 UT начинается практически полное согласование данных. Можно заметить, что с 05 до 06 UT в группе из трех инструментов наименьшие различия зафиксированы в данных ЛЧМ-ионозонда и радара НР. Такой характер различия может объясняться разным географическим положением инструментов (см. рис. 1), если допустить наличие очень сильных градиентов электронной концентрации в восточно-западном направлении. Исходя из разницы в критической частоте $\sim 1,5$ МГц, градиент электронной концентрации должен составлять $\sim 2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ на 100 км. На интервале 05–06 UT различия проявляются не только в критической частоте, но и в высоте максимума электронной концентрации. Значения высоты, полученные на ЛЧМ-ионозонде, существенно превышают значения дигизонда, а данные радара НР имеют промежуточные значения.

На рис. 5 приведены профили электронной концентрации $N_e(z)$, построенные по данным трех инструментов. Сравнение профилей электронной концентрации показывает, что в 05:00, 05:15, 05:30, 05:45 UT три инструмента дают сильно отличающиеся результаты, в 06:00 — довольно близкие, в 06:45 профили дигизонда и ЛЧМ-ионозонда практически совпадают. В 05:15 и 05:30 радар НР и ЛЧМ-ионозонд дают близкие значения максимальной электронной концентрации, но значения N_e на высоте ~ 250 км различаются примерно на $2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$, приблизительно настолько же различаются значения дигизонда и радара НР.

Тот факт, что все три инструмента дают различные профили электронной концентрации, уже невозможно объяснить только градиентами в восточно-западном направлении. По всей видимости, неоднородная структура ионосферы носила облачный характер со сложной высотной зависимостью. Не исключено, что в такой сложной среде ни один из инструментов не дает «истинный» высотный профиль электронной концентрации. Траектория распространения сигнала ЛЧМ-ионозонда может существенно отклоняться от дуги большого круга. Возможно появление многолучевости.

При вертикальном зондировании могут возникнуть наряду с вертикальными отражениями и мощные боковые отражения. А на данные радара НР заметное влияние оказывает различное положение главных лепестков диаграммы направленности на разных высотах (см. рис. 1) и довольно-таки большая ширина (~ 100 км) лепестков в восточно-западном направлении.

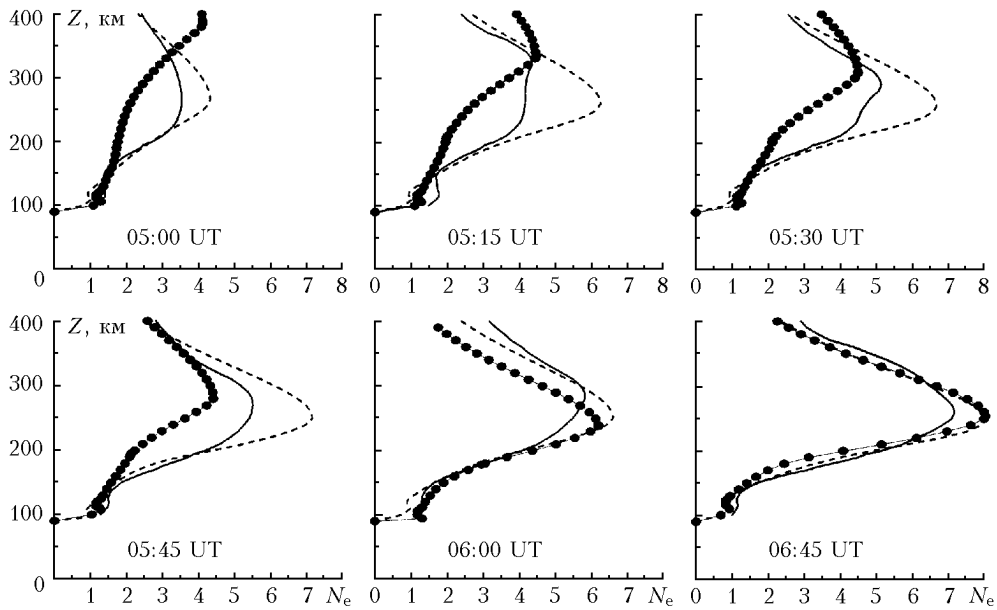


Рис. 5. Профили электронной концентрации $N_e(z)$ ($10^{-5} \cdot \text{эл./см}^3$) 29.10.2003 г. (обозначения см. рис. 3)

Для оценки характеристик неоднородной структуры ионосферы необходимо проведение достаточно сложного моделирования, учитывающего выше-названные факторы, сейчас же можно ограничиться только оценкой градиента максимального значения электронной концентрации, составляющего величину порядка $2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ на 100 км.

На рис. 6 приведены ионограммы, полученные на дигизонде и ЛЧМ-ионозонде в 05:00, 05:30 и 06:00 UT. Если в 06:00 UT ионограммы довольно

близки, то в 05:00 и 05:30 UT наблюдаются совершенно различные картины.

Следы от F1-слоя, наблюдаемые на ионограммах ЛЧМ-ионозонда, не видны на ионограммах дигизонда, а различия в $h'F2$ составляют 250 и 200 км для 5:00 и 5:30 UT соответственно. Возможно, что более сложный след ЛЧМ-ионозонда является результатом траекторий, реализуемых при слабонаклонном распространении и не реализуемых при вертикальном.

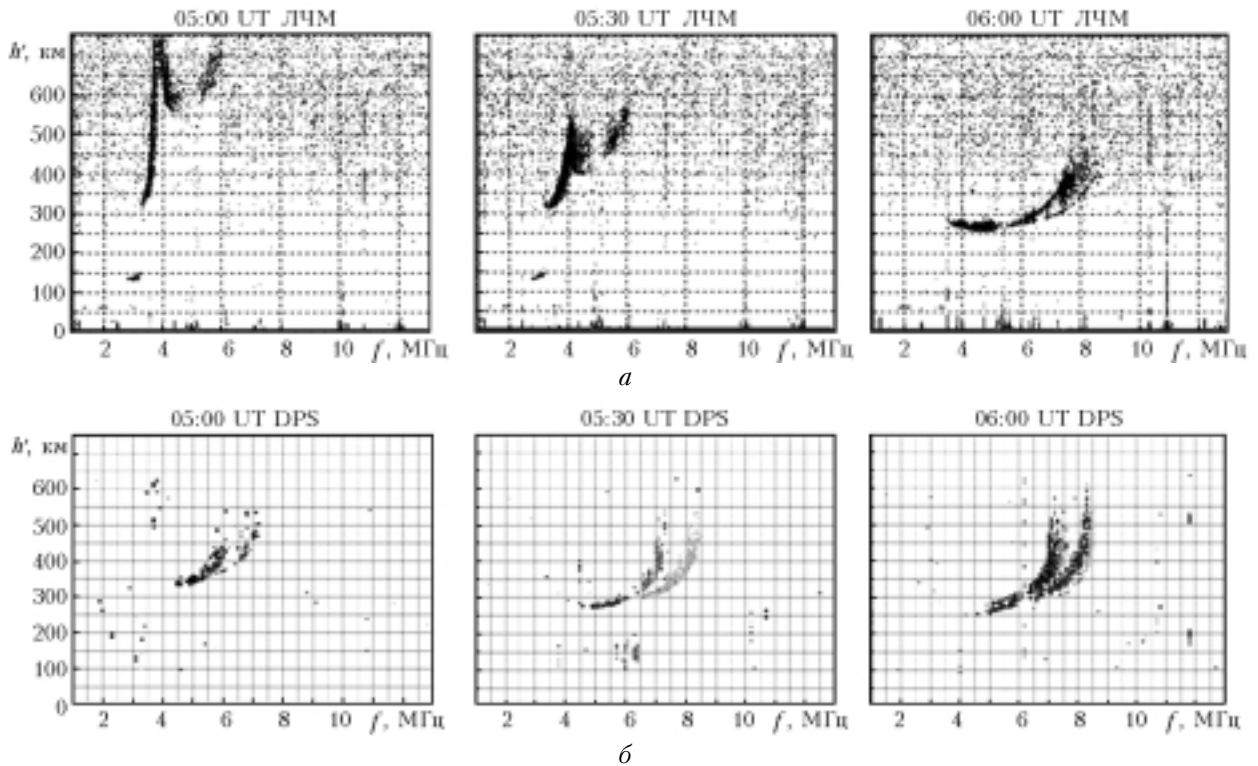


Рис. 6. Ионограммы ЛЧМ-ионозонда (а) и дигизонда DPS-4 (б)

Необходимо отметить, что наблюдение наиболее сильных различий между тремя инструментами с 05 до 06 UT 30.10 не говорит о том, что наличие сложной неоднородной структуры ионосферы было характерно только для этого интервала времени. Вполне вероятно, что другие случаи сильных расхождений не были зафиксированы из-за отсутствия данных ионозондов по причине сильного поглощения.

Выводы

Результаты исследования ионосферного отклика на суперпозицию двух магнитных бурь на основе одновременных измерений на дигизонде DPS-4, ЛЧМ-ионозонде и радаре НР выглядят следующим образом. В спокойных условиях (спокойный день 01.11 и в перерыве между бурями 30.10) все три инструмента дают близкие результаты. Парно хорошо согласуются данные дигизонда и радара НР в начальной фазе первой бури и данные дигизонда и ЛЧМ-ионозонда на главной стадии второй бури. Наибольшие отличия наблюдаются на фазе восстановления первой бури. Наблюдаемые отличия обусловлены сильно развитой неоднородной структурой ионосферы и различным географическим положением инструментов. Оценка градиента максимального значения электронной концентрации в восточно-западном направлении составляет величину порядка $2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ на 100 км. Для более детальной оценки характеристик неоднородной структуры необходимо создание комплекса моделирова-

ния, учитывающего сложный характер распространения радиоволн в неоднородной ионосфере.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 03-05-64627 и 03-05-64527) и в рамках гранта НШ-272.2003.5 государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации.

1. *Reinisch B.W., Haines D.M., Bibl K., Galkin I., Huang X., Kitrosser D.F., Sales G.S., and Scali J.L.* Ionospheric sounding support of OTH radar // *Radio Sci.* 1997. V. 32. N 4. P. 1681–1694.
2. *Матюшонок С.М., Савченко Т.Н.* Многофункциональный приемный комплекс ионосферного зондирования: Излучение и рассеяние ЭМВ // *Тр. Междунар. науч. конф. Таганрог*, 2003. С. 283–286.
3. *Brynko I.G., Galkin I.A., Grozov V.P., Dvinskikh N.I., Nosov V.E., Matyushonok S.M.* An automatically controlled data gathering and processing system using an FMCW ionosonde // *Adv. Space Res.* 1988. V. 8. N 4. P. 121–124.
4. *Грозов В.П., Носов В.Е., Котович Г.В., Ким А.Г., Матюшонок С.М., Ратовский К.Г.* Сравнение основных параметров ионосферы на слабонаклонной трассе с данными вертикального зондирования // *Геомagnetизм и аэронав.* 2004. Т. 44. № 3. С. 1–6.
5. *Жеребцов Г.А., Заворин А.В., Медведев А.В., Носов В.Е., Потехин А.П., Шпынев Б.Г.* Иркутский радар некогерентного рассеяния // *Радиотехн. и электрон.* 2002. Т. 47. № 11. С. 1–7.
6. *Potekhina A.P., Berngardt O.I., Kurkin V.I., Shpynev B.G., Zherebtsov G.A.* Observation of abnormally powerful scattering with ISTP IS radar // *Proc. SPIE.* 1999. V. 3983. P. 328–335.

A.G. Kim, V.P. Grozov, K.G. Ratovsky, A.V. Medvedev, A.P. Potekhina, B.G. Shpynev. **Behavior features of ionosphere F-layer parameters in Irkutsk during the magnetic storm on October 29–31, 2003.**

The powerful magnetic storm of October 29–31, 2003 was a superposition of two strong magnetic storms from solar flashes October 28 (X17.02) and 29 (X10.00). Ionosphere response to the magnetic storm in Irkutsk was investigated by DPS-4 digisonde, FMCW-sounder, and incoherent scatter radar.

In this work the main attention is given to the analysis of distinctions in the data obtained with the three different facilities. The general features of ionosphere response coincide for all the three tools. Appreciable distinctions are observed both in the main phases of the both storms and in the phase of the first storm restoration.

Distinctions during regeneration phase are explained by distinction in geographical positions of the tools: the average point of FMCW-sounder path is located 100 km west from Irkutsk DPS-4 and almost coincides with the position of the incoherent scatter radar beam. The discrepancy in the data of the FMCW-sounder and radar is essentially less in comparison with the discrepancy from the digisonde data. Such a character of distinction testifies to presence of very strong gradients of electron concentration in the east-western direction during the magnetic storm restoration phase.