

УДК 550.388.2

## ИОНОСФЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ РЕНТГЕНОВСКИХ ВСПЫШЕК 24 СЕНТЯБРЯ 2011 ГОДА ПО ДАННЫМ НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

*Г. Г. Вертоградов*<sup>1</sup>, *Е. Г. Вертоградова*<sup>1</sup>, *В. П. Урядов*<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону;

<sup>2</sup> Научно-исследовательский радиофизический институт, г. Нижний Новгород, Россия

Представлены результаты наблюдений внезапного широкополосного ослабления коротких радиоволн и вариаций доплеровского смещения частоты сигналов радиовещательных станций на трассах наклонного зондирования в евро-азиатском долготном секторе во время серии рентгеновских вспышек, имевших место 24 сентября 2011 года. Приведены результаты моделирования профилей электронной концентрации в нижней ионосфере по данным измерений ослабления коротких радиоволн на трассе Москва—Ростов-на-Дону на частоте 9996 кГц станции точного времени RBM во время наиболее мощной вспышки, произошедшей в 09:40 UT 24.09.2011.

### ВВЕДЕНИЕ

Известно, что солнечные вспышки рентгеновского излучения сильно влияют на ионосферу Земли, вызывая такие эффекты, как внезапное широкополосное ослабление радиосигналов и изменение частоты радиоволн, отражённых от ионосферы [1–4]. Исследование ионосферных эффектов солнечных вспышек представляет интерес с точки зрения изучения реакции ионосферной плазмы на импульсную ионизацию. Дело в том, что в обычных невозмущённых условиях исследуются суточные и сезонные изменения ионных химических процессов и взаимодействие между электронами, ионами и нейтральными частицами; это медленные процессы, по которым сложно судить о быстрых событиях в ионосфере. Мощная рентгеновская вспышка является импульсным воздействием на ионосферу. Поэтому исследование отклика на неё предоставляет возможность изучать быстрые ионосферные явления.

С другой стороны, изучение ионосферных эффектов от рентгеновских вспышек и сопутствующих им явлений типа блэкаута (полного поглощения) имеет большое значение для прогнозирования работы радиоэлектронных систем различного назначения.

В связи с этим понятен неослабевающий интерес к ионосферным эффектам от солнечных вспышек на протяжении последних десятилетий. Особый интерес представляет использование современной техники зондирования, обладающей высокой чувствительностью и повышенной разрешающей способностью.

В данной работе представлены результаты наблюдений внезапного широкополосного ослабления коротких радиоволн и вариаций доплеровского смещения частоты сигналов радиовещательных станций на трассах наклонного зондирования в евро-азиатском долготном секторе во время серии рентгеновских вспышек, имевших место 24 сентября 2011 года. Результаты получены с помощью техники широкополосного зондирования с использованием многочастотного доплеровского коротковолнового радара.

---

\* uryadovvp@nirfi.sci-nnov.ru

## 1. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Ионосферные эффекты от рентгеновских вспышек регистрировались на среднеширотной трассе между ИЗМИРАН (г. Москва,  $55,48^\circ$  с. ш.,  $37,31^\circ$  в. д.) и г. Ростов-на-Дону ( $47,2386^\circ$  с. ш.,  $39,6417^\circ$  в. д.) с протяжённостью 931 км, азимут на передатчик  $350,62^\circ$ . Использовался метод наклонного зондирования с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) сигнала с помощью ионозонда-радиопеленгатора [5–8] и метод наклонного многочастотного зондирования на ряде фиксированных частот с высоким спектральным разрешением с помощью многочастотного доплеровского коротковолнового радара [6].

ЛЧМ-передатчик, размещённый в ИЗМИРАН, работал в диапазоне частот  $2 \div 21$  МГц, скорость перестройки частоты составляла 100 кГц/с, начало работы с 1-минуты часа с периодом 5 мин. Приём осуществлялся на антенную решётку, состоящую из 16 активных антенных элементов, размещённых на площадке с размерами  $100 \times 100$  м.

Многочастотный доплеровский коротковолновый радар контролировал 30 частот широкоэмиттерных радиостанций с высокостабильной несущей частотой в диапазоне от 9480 до 21610 кГц, а также частоты станции точного времени РВМ (г. Москва): 4996; 9996 и 14996 кГц. Сигналы всех передатчиков принимались синхронно от одной приёмной штыревой пассивной антенны с высотой 9 м, расположенной на поверхности земли. Выбранные передатчики для многочастотного доплеровского радара позволяли из приёмного пункта в г. Ростов-на-Дону контролировать распространение радиоволн практически на всём евро-азиатском континенте: от Испании на западе до Китая на востоке, от Турции на юге до радиопередатчиков московского региона на севере. Круглосуточный период наблюдений 24 сентября 2011 года характеризовался низкой магнитной активностью: индекс  $K_p \leq 2$ .

Согласно данным наклонного ЛЧМ-зондирования, на трассе Москва–Ростов-на-Дону имели место ионосферные эффекты, связанные с вариацией уровня принимаемых сигналов в широкой полосе частот. Это выразилось, в первую очередь, в увеличении наименьшей наблюдаемой частоты и, как следствие, в сужении диапазона частот прохождения коротких радиоволн. Рисунок 1 иллюстрирует динамику диапазона частот прохождения коротких радиоволн (от наименьшей наблюдаемой частоты до максимальной наблюдаемой частоты) во время рентгеновских вспышек. Стрелкой на рис. 1 отмечен момент времени максимального потока рентгеновского излучения во время вспышек. Как видно из рис. 1, диапазон частот прохождения коротких радиоволн наиболее сильно сократился 24 сентября в 09:41 UT. Измерения показали, что во время блэкаута сигнал ослаблялся на различных частотах до  $40 \div 50$  дБ по мощности.

Полагая, что эффект внезапного широкополосного поглощения коротких радиоволн на трассе Москва–Ростов-на-Дону был обусловлен воздействием на нижнюю ионосферу рентгеновского излучения солнечных вспышек, мы провели анализ результатов наблюдений с использованием данных о потоке рентгеновского излучения, полученных со спутника GOES [9]; см. рис. 2.

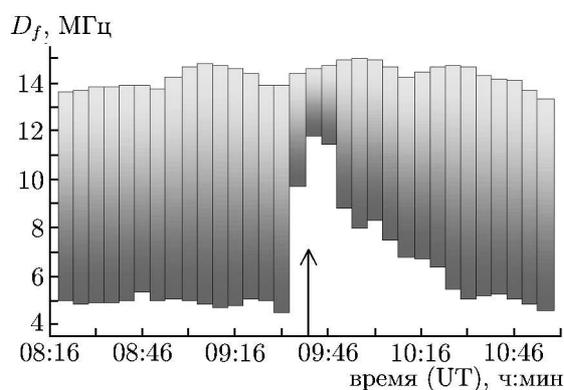


Рис. 1. Диапазон частот прохождения радиоволн (наименьшая наблюдаемая частота—максимальная наблюдаемая частота) на трассе Москва–Ростов-на-Дону во время рентгеновской вспышки 24.09.2011. Стрелкой отмечен момент времени максимального потока вспышки рентгеновского излучения Солнца

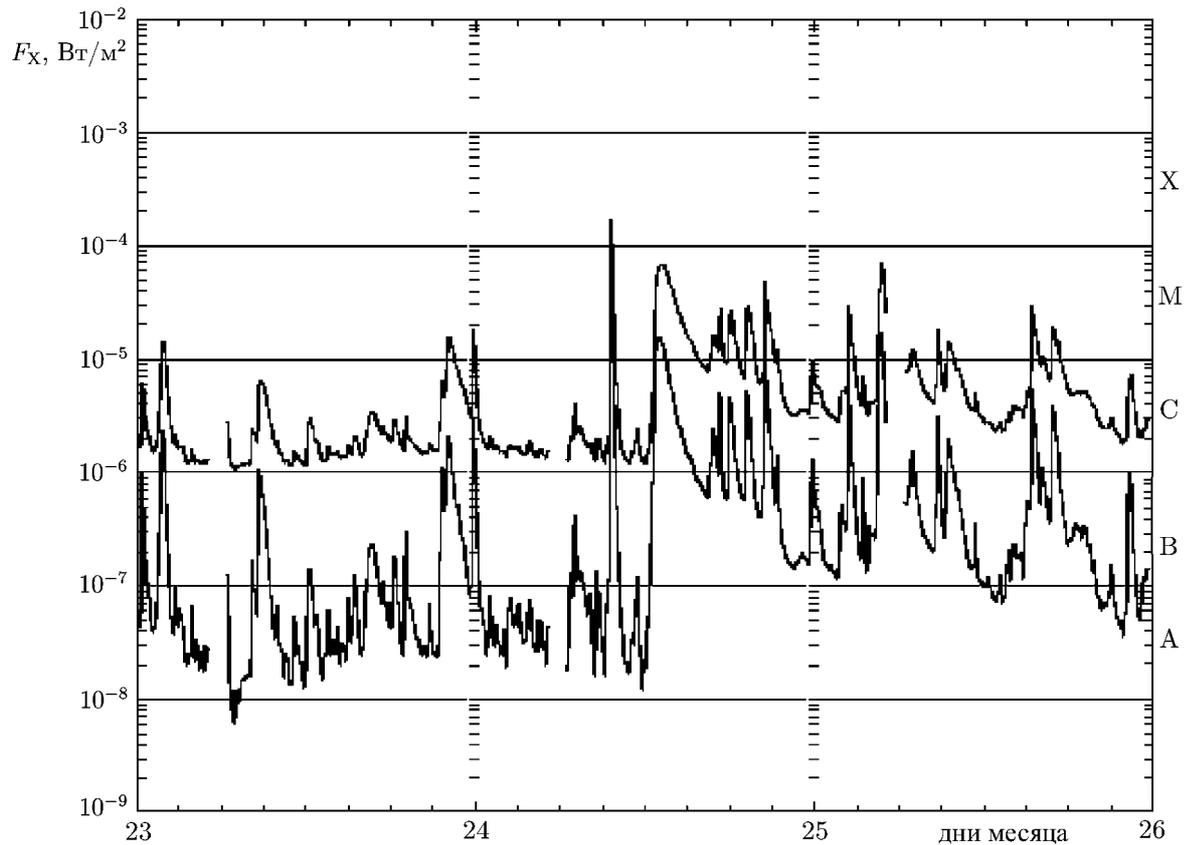


Рис. 2. Плотность потока рентгеновских лучей  $F_X$  23–25 сентября 2011 года по данным спутника GOES [9]. Нижняя кривая соответствует интервалу длин волн  $0,5\div 4,0 \text{ \AA}$ , верхняя кривая — интервалу  $1,0\div 8,0 \text{ \AA}$ . На правой оси указан класс вспышки

На рис. 3а показан поток рентгеновского излучения в диапазонах волн  $\lambda = 0,5\div 4,0 \text{ \AA}$  (штриховая кривая) и  $\lambda = 1,0\div 8,0 \text{ \AA}$  (сплошная кривая). На рис. 3б и в показаны участки графиков в окрестности всплесков потока рентгеновского излучения. Стрелками на рисунках показаны моменты времени, когда наблюдалась наибольшая скорость изменения потока. Как выяснилось при дальнейшей обработке доплеровских измерений, эти участки связаны с особым поведением доплеровского смещения частоты диагностических сигналов на различных частотах (данный эффект обсуждается ниже).

Как можно видеть из рис. 2 и 3, в период регистрации широкополосного ослабления сигнала на трассе Москва—Ростов-на-Дону наблюдалась рентгеновская вспышка класса X1.9. При этом в интервале длин волн рентгеновского излучения  $0,5\div 4,0 \text{ \AA}$  максимальный поток равен  $8,73 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/м}^2$  и достигается в момент времени 34 740 с (09:39 UT). В интервале длин волн рентгеновского излучения  $1,0\div 8,0 \text{ \AA}$  максимальный поток равен  $1,91 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/м}^2$  и согласно данным [9] достигается в момент времени 34 800 с (09:40 UT).

Многочастотный доплеровский радар позволил контролировать реакцию ионосферы на рентгеновские вспышки в широкой полосе частот зондирования на всём евро-азиатском континенте. Для этого в течение 24 сентября 2011 года контролировались 30 частот, на части которых в интересующие нас моменты времени принимались сигналы широкополосных станций (на частотах 9 685; 11 675; 11 795; 11 875; 12 030; 12 055; 13 790; 21 540 и 21 610 кГц) и станции точного времени РВМ в г. Москва (на частотах 4 996; 9 996 и 14 996 кГц).

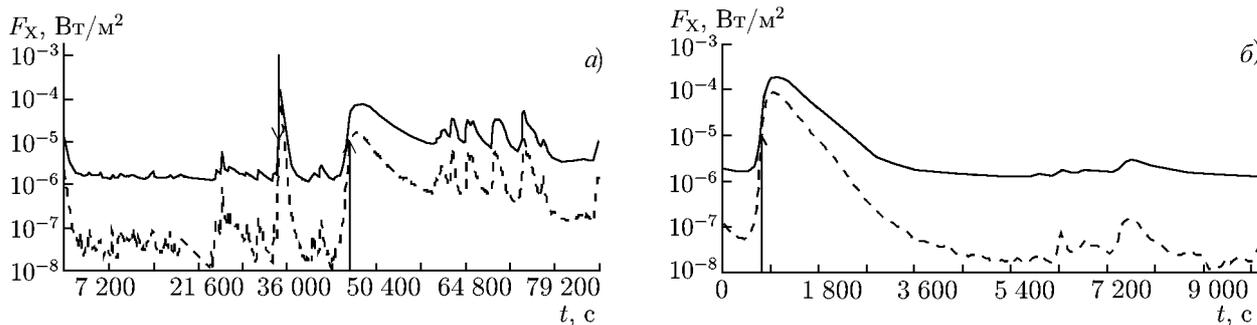


Рис. 3. Плотность потока  $F_X$  рентгеновских лучей 24 сентября 2011 года по данным спутника GOES [9] — панель *a*. Штриховая кривая соответствует длинам волн  $0,5 \div 4,0 \text{ \AA}$ , сплошная кривая — длинам волн  $1,0 \div 8,0 \text{ \AA}$ . На панелях *б* и *в* показаны участки с панели *a* в окрестности всплесков рентгеновского излучения. На панели *a* начало отсчёта соответствует 00:00 UT, на панели *б* — 09:23:20 UT, на панели *в* — 12:23:20 UT. Стрелками на рисунках показаны моменты времени наибольшей скорости изменения потока рентгеновского излучения

В период первой рентгеновской вспышки на временном интервале 09:23 ÷ 10:23 UT принимались сигналы следующих широкоэвещательных станций: 11 675 кГц (Сингапур); 12 055 и 13 790 кГц (Китай); 11 795 кГц (Турция); 21 540 и 21 610 кГц (Испания).

После обработки данных многочастотного доплеровского радара получена зависимость доплеровского смещения частоты основной моды распространения от времени  $\delta f(t)$  и зависимость её амплитуды от времени  $E(t)$ . Эти зависимости для вспышки в период 09:23 ÷ 10:23 UT показаны на рис. 4–9 (*a* —  $\delta f(t)$ , *б* —  $E(t)$ ). На рис. 4–8, а также рис. 10 (панели *б*) амплитуда  $E$  сигналов приведена в децибелах относительно максимальной разрядности аналого-цифрового преобразователя. Рисунок 9 отличается тем, что здесь показана напряжённость поля  $E$  доминирующей моды распространения в децибелах относительно 1 мкВ/м. Это сделано для того, чтобы в дальнейшем можно было бы сравнить результаты эксперимента и имитационного моделирования. На всех рисунках по оси абсцисс отложено время в секундах от момента 09:23:20 UT.

Как видно из рис. 4–9, на всех трассах в течение 20 мин с момента 09:40 UT наблюдался блэкаут сигналов контролируемых передатчиков. На рисунках стрелками показан момент, когда поток рентгеновского излучения был максимален. Этот момент времени совпадает с началом максимального подавления сигнала контролируемых передатчиков. Отметим, что на низких частотах, например 4 996 кГц (станция РВМ, рис. 4), полное поглощение наблюдается в течение примерно 1 600 с (27 мин). На высоких частотах полное поглощение длится около 450 с (7 ÷ 8 мин). Таким образом, рентгеновская вспышка сказалась в глобальном масштабе на ионосфере Земли и на распространении коротких радиоволн на всём евро-азиатском континенте.

По данным на рис. 9 (частота 9 996 кГц, станция РВМ) оценены параметры фронтов спада и нарастания амплитуды сигнала (времена релаксации). На переднем фронте амплитуда спадала со скоростью  $-0,5568 \text{ дБ/с}$  (характерное время релаксации 17,96 с). Нарастающий фронт состоит из двух участков с различными скоростями возрастания амплитуды сигнала. На первом участке амплитуда возрастает со скоростью  $0,09353 \text{ дБ/с}$  (характерное время релаксации 106,9 с), на более позднем участке амплитудный фронт нарастает со скоростью  $0,044857 \text{ дБ/с}$  (характерное

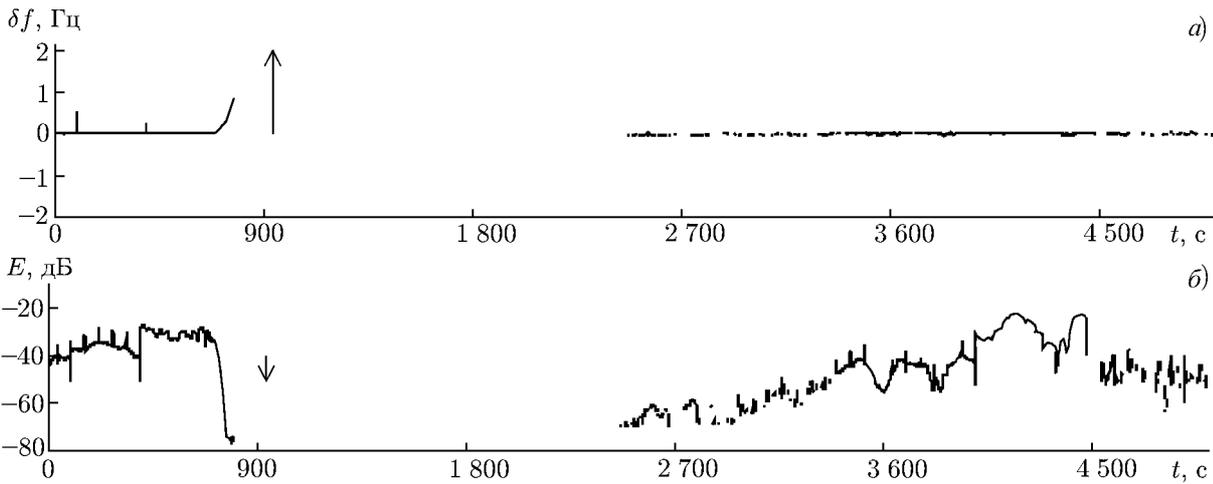


Рис. 4. Характеристики сигнала станции RBM на частоте 4996 кГц. Начало измерений соответствует 09:23:20 UT. Стрелками отмечен момент максимального потока рентгеновского излучения

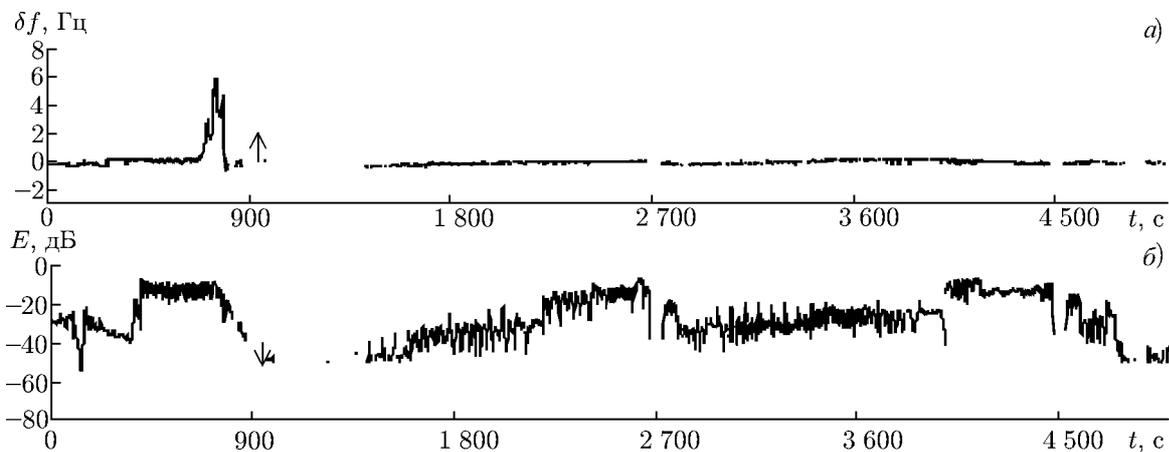


Рис. 5. Характеристики сигнала станции RBM на частоте 14996 кГц. Начало измерений соответствует 09:23:20 UT. Стрелками отмечен момент максимального потока рентгеновского излучения

время релаксации 222,9 с). Под характерным временем изменения амплитуды сигнала (временем релаксации) здесь понимается время, в течение которого амплитуда уменьшается или возрастает на 10 дБ. Период минимальной амплитуды (подавленной примерно на 62 дБ относительно невозмущённого состояния) длится около 440 с. После этого амплитуда принимаемого сигнала начинает медленно восстанавливаться с указанными выше временами релаксации.

На всех трассах наблюдается другая характерная особенность: перед блэкаутом резко изменяется доплеровское смещение частоты сигнала. Амплитуда доплеровского смещения частоты зависит от частоты зондирующих сигналов и может достигать 15÷20 Гц на высоких частотах. При этом доплеровское смещение частоты принимаемого сигнала испытывает глубокие квазипериодические вариации. Отметим, что в первом максимуме доплеровское смещение частоты положительно. Этот положительный максимум приходится на момент времени, когда скорость нарастания потока рентгеновского излучения максимальна (см. рис. 3). После достижения первого максимума доплеровское смещение частоты уменьшается, быстро флуктуируя (см. рис. 5–9). Наблюдается до 6÷7 квазипериодов флуктуаций, квазипериоды составляют 20÷30 с. Далее ам-

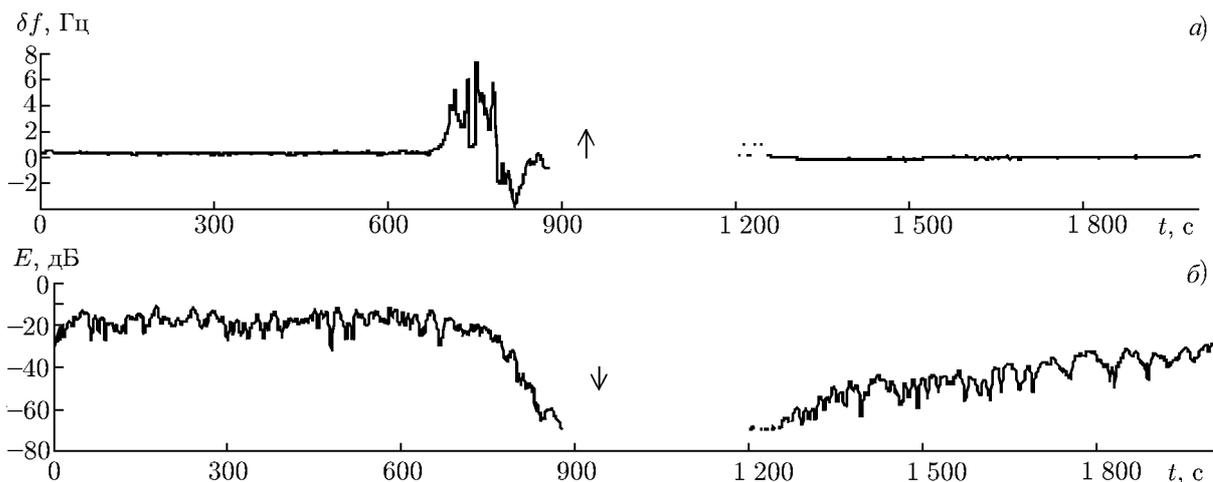


Рис. 6. Характеристики сигнала широкоэвещательной станции на частоте 11 795 кГц (Турция). Начало измерений соответствует 09:23:20 UT. Стрелками отмечен момент максимального потока рентгеновского излучения

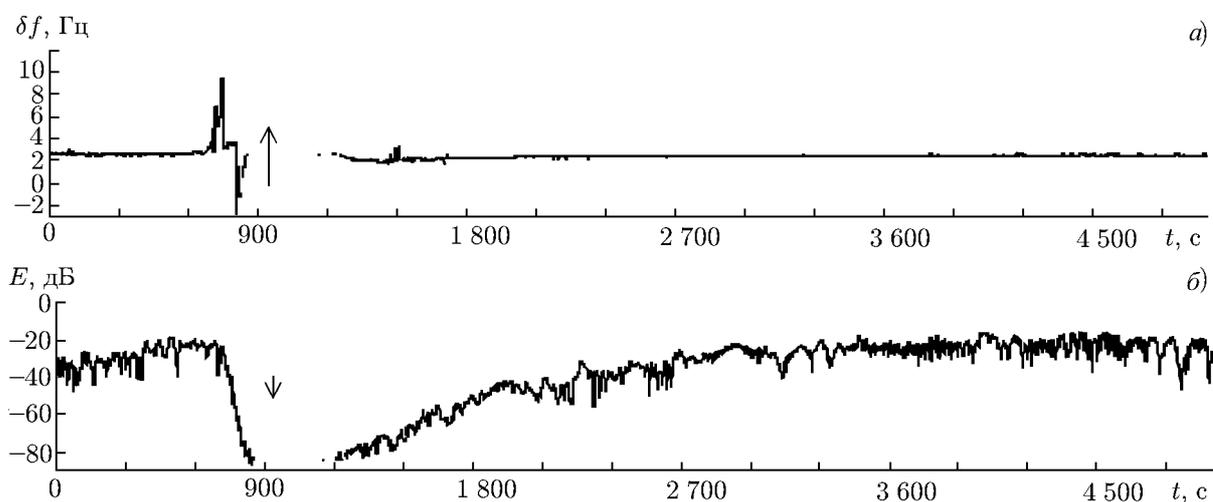


Рис. 7. Характеристики сигнала широкоэвещательной станции на частоте 13 790 кГц (Китай). Начало измерений соответствует 09:23:20 UT. Стрелками отмечен момент максимального потока рентгеновского излучения

плитуда сигнала быстро уменьшается и наступает блэкаут.

На заднем фронте, когда амплитуда сигналов восстанавливается после блэкаута, также наблюдается небольшое доплеровское смещение частоты относительно невозмущённой ситуации. Смещение здесь также положительно и не велико — примерно 2 Гц. Доплеровское смещение частоты на заднем фронте практически не флуктуирует. Как следствие, можно утверждать, что предвестником проявления рентгеновской вспышки являются внезапные быстрые флуктуации доплеровского смещения частоты с квазипериодами 20÷30 с. Только после затухания флуктуаций наступает блэкаут той или иной категории.

Как можно видеть из рис. 2 и 3а, в в период 13:00÷14:00 UT 24 сентября 2011 года наблюдалась вторая рентгеновская вспышка класса M7.1. При этом в интервале длин волн рентгеновского излучения 0,5÷4,0 Å максимальный поток равен  $1,64 \cdot 10^{-5}$  Вт/м<sup>2</sup> и достигается в момент времени 47 340 с (13:09 UT, см. рис. 3а, в). В интервале длин волн 1,0÷8,0 Å максимальный поток равен

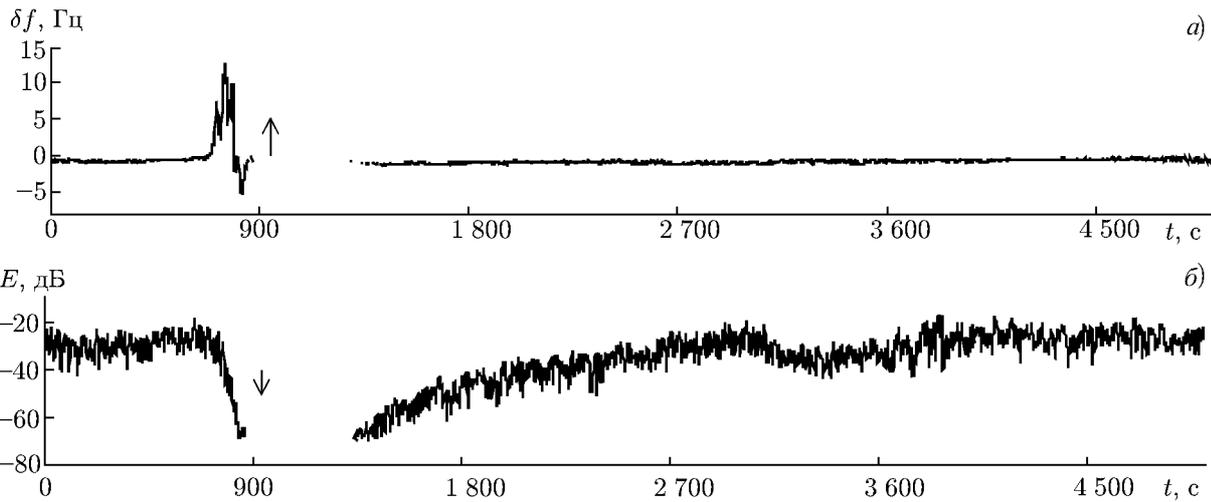


Рис. 8. Характеристики сигнала широковещательной станции на частоте 21 610 кГц (Испания). Начало измерений соответствует 09:23:20 UT. Стрелками отмечен момент максимального потока рентгеновского излучения

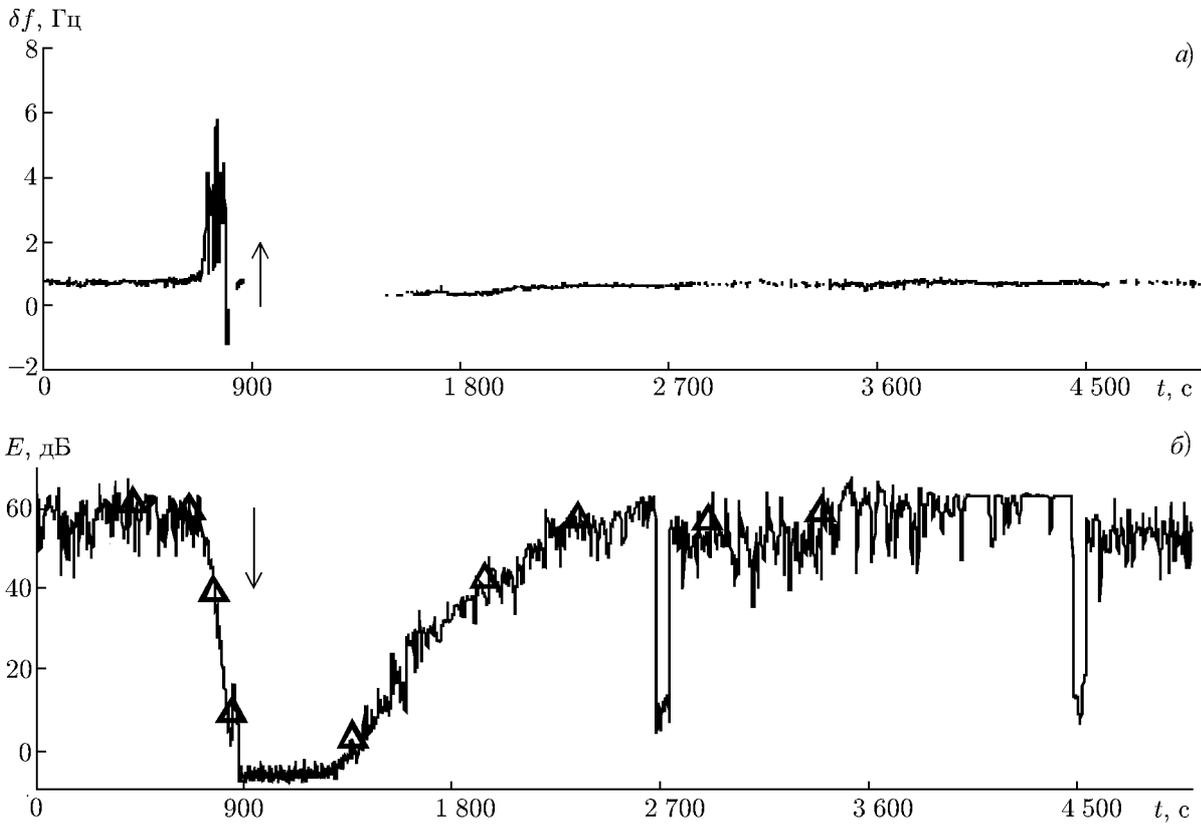


Рис. 9. Изменения доплеровского смещения частоты  $\delta f$  и уровня сигнала  $E$  станции RBM (частота 9 996 кГц) на трассе Москва—Ростов-на-Дону во время рентгеновской вспышки 24 сентября 2011 года. Стрелками на рисунках показаны моменты времени максимального потока рентгеновского излучения в диапазоне длин волн 1,0÷8,0 А. Начало измерений соответствует 09:23:20 UT

$7,12 \cdot 10^{-4}$  Вт/м<sup>2</sup> и достигается в момент времени 47 880 с (13:18 UT, см. рис. 3а, в). Наблюдался блэкаут категории R2.

Во время второй рентгеновской вспышки на временном интервале 13:00÷14:00 УТ принимались сигналы следующих широкополосных станций: 9685; 11675 и 13790 кГц (Китай); 11875 кГц (Румыния); 12030 кГц (Новосибирск); 12055 кГц (Иркутск); 21540 кГц (Испания).

Результат обработки данных многочастотного доплеровского радара на временном интервале второй рентгеновской вспышки показан на рис. 10.

Вторая рентгеновская вспышка была слабее, поэтому блэкаут наблюдался только на низких частотах, например, для частоты 4996 кГц станции точного времени РВМ (см. рис. 10). На более высоких частотах наблюдались незначительные изменения амплитуды сигнала. Амплитуда сигнала уменьшалась не более чем на 10÷20 дБ. Однако по-прежнему фиксируется предвестник блэкаута — быстрые изменения доплеровского смещения частоты. Первый максимум смещения частоты снова приходится на момент времени, когда максимальна скорость изменения потока рентгеновского излучения. На рис. 3а, в этот момент времени отмечен стрелкой. На всех частотах фиксируются 2÷3 квазипериода доплеровского смещения частоты контролируемого сигнала. Релаксационный процесс длится около 300 с.

Изменение амплитуды сигнала во время рентгеновской вспышки связано со значительным увеличением электронной концентрации в  $D$ -области ионосферы, тогда как вариации доплеровского смещения частоты в значительной мере связаны с изменениями в областях ионосферы  $E$ ,  $F_1$  и  $F_2$ . Причём предвестник блэкаута — значительное положительное доплеровское смещение частоты — наблюдался на всех контролируемых трассах с различной протяжённостью и ориентацией и на различных частотах. Это свидетельствует о глобальном синхронном изменении ионосферной плазмы в  $F$ -области ионосферы. Положительное смещение частоты указывает, что на первой стадии внезапного изменения частоты радиосигналов во время рентгеновской вспышки преобладают процессы образования электронов. Согласно монографии [1], вспышка вызывает значительное изменение электронной концентрации  $N_e$  в  $E$ -слое ионосферы, которое уменьшается с ростом высоты, но остаётся заметным вплоть до 300 км. Квазипериодические затухающие колебания доплеровского смещения частоты радиосигналов на стадии развития внезапного всплеска рентгеновского и ультрафиолетового излучений могут быть обусловлены различной скоростью образования электронов и их исчезновения за счёт прилипания и радиативной рекомбинации на различных высотах ионосферы.

Смещение частоты радиосигнала  $\Delta f$  пропорционально скорости изменения фазового пути сигнала согласно работе [4]:

$$\Delta f = -\frac{f}{c} \int \frac{\partial n}{\partial t} ds, \quad (1)$$

где  $n$  — показатель преломления. Смещение частоты радиосигнала при распространении радиоволны в ионосфере можно трактовать как эффект Доплера, обусловленный изменением во времени фазового пути за счёт движения отражающих слоёв и/или изменения концентрации электронов на трассе распространения. Если изменение фазового пути вызвано изменением высоты отражающего слоя, то смещение частоты пропорционально частоте, т. е.  $\Delta f \propto f$ . Если происходит дополнительная ионизация ионосферы ниже уровня отражения, когда изменяется электронная концентрация  $N_e(t)$ , то для показателя преломления  $n = [1 - \alpha N(t)/f^2]^{1/2}$  и высоких частот  $f^2 \gg \alpha N(t)$  из формулы (1) следует, что смещение частоты  $\Delta f \approx \alpha/(2cf) \int (\partial N/\partial t) ds$  (здесь  $\alpha$  — некоторый постоянный коэффициент). На практике могут реализоваться различные промежуточные случаи изменения частоты радиосигналов в зависимости от протяжённости трассы, высотного распределения электронной концентрации, рабочей частоты, интенсивности вспышки и её временного профиля, преобладания тех или иных процессов в ионосферной плазме.

Квазипериодические вариации частоты радиосигналов могут быть обусловлены квазипериодическими флуктуациями ионосферной плазмы в глобальном масштабе на уровне  $F$ -области

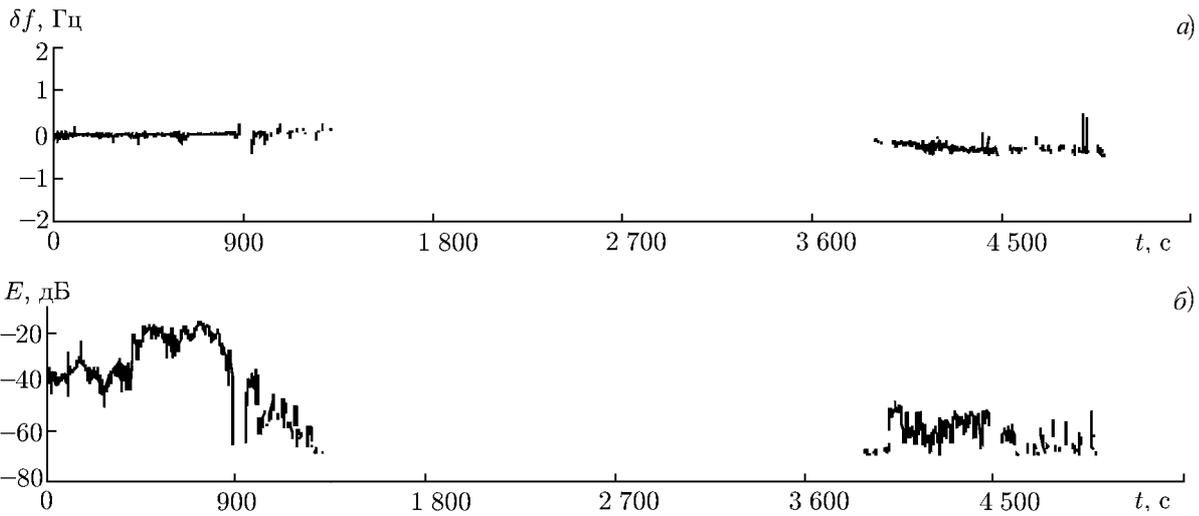


Рис. 10. Характеристики сигнала станции RBM на частоте 4996 кГц. Начало измерений соответствует 12:23:20 UT. Показаны смещение частоты  $\delta f$  (а) и амплитуда  $E$  (б) принимаемого сигнала в зависимости от времени

ионосферы, когда импульсное воздействие рентгеновской вспышки порождает солитоноподобную волну электронной концентрации в  $F$ -области ионосферы. Но этот вопрос требует дальнейших исследований.

Чтобы оценить изменения электронной концентрации в нижней ионосфере под влиянием мощных рентгеновских вспышек, выполнены расчёты для трассы Москва—Ростов-на-Дону для первой вспышки, произошедшей в 09:39 UT 24 сентября 2011 года. Оценки выполнены с помощью ДАСФ-модели [10] путём подбора такого распределения электронной концентрации, для которого расчётная напряжённость поля принимаемых декаметровых волн от контролируемого передатчика согласуется с экспериментальными данными. Экспериментальные данные напряжённости поля доминирующей моды распространения на трассе Москва—Ростов-на-Дону показаны на рис. 9. Рабочая частота контролируемого передатчика 9996 кГц.

Чтобы адаптировать модель IRI-2012 к экспериментальным данным на рис. 9, для каждого момента времени подбиралось поглощение обыкновенной волны на частоте 2,2 МГц при вертикальном падении. При этом автоматически корректировался высотный профиль  $N_e(h)$  в нижней ионосфере на высотах до 100 км. Для этого модельный профиль IRI-2012 электронной концентрации ниже максимума  $E$ -слоя ионосферы задавался выражением

$$N_e(h) = N_0(h) \exp[-\alpha_0 (h - h_m)^2].$$

Здесь  $N_0(h)$  — невозмущённый профиль в модели IRI-2012,  $h_m$  — высота максимума  $E$ -слоя ионосферы, параметр  $\alpha_0$  подлежит коррекции по заданному поглощению обыкновенной волны на частоте 2,2 МГц при вертикальном падении на ионосферу. В результате имитационного моделирования для каждого момента времени подбиралось такое поглощение на частоте 2,2 МГц, при котором измеренная напряжённость поля на частоте 9996 кГц (рис. 9) совпала бы с расчётной для трассы Москва—Ростов-на-Дону.

Получены следующие интегральные по трассе коэффициенты поглощения обыкновенной волны на частоте 2,2 МГц при вертикальном падении на ионосферу: 29; 36; 110; 217; 242; 100; 45; 47 и 39 дБ для моментов времени 24 сентября 09:30, 09:34, 09:35, 09:37, 09:45, 09:55, 10:02, 10:10 и 10:11 UT соответственно. Рисунок 9 представляет результаты расчёта напряжённости поля на

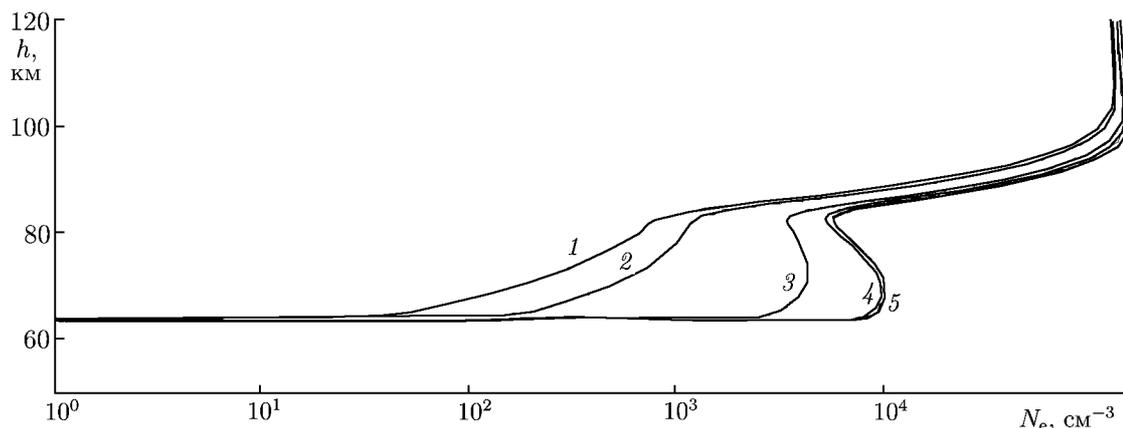


Рис. 11. Профиль  $N_e(h)$  в нижней ионосфере, восстановленный по результатам ослабления сигналов станции РВМ (частота 9 996 кГц) на трассе Москва—Ростов-на-Дону 24.09.2011. Кривая 1 соответствует моменту времени 09:30 UT, 2 — 09:34 UT, 3 — 09:35 UT, 4 — 09:37 UT, 5 — 09:45 UT

частоте 9 996 кГц для трассы Москва—Ростов-на-Дону, где распределение электронной концентрации корректировалось по описанной методике для различных моментов времени. Треугольниками на рис. 9 отмечены рассчитанные значения напряжённости поля  $E$  после того, как пространственное распределение электронной концентрации в нижней ионосфере адаптировалось к измеренным уровням сигнала станции РВМ. Видно, что достигнуто хорошее согласие между прогнозируемой напряжённостью поля высокочастотных волн и экспериментальными данными. На рис. 11 показаны соответствующие профили  $N_e(h)$  для нескольких моментов времени от возникновения вспышки до окончания релаксационных процессов в нижней ионосфере. Кривая 1 на рис. 11 соответствует невозмущённым условиям, а кривая 5 — максимальной ионизации в нижней ионосфере при максимальном потоке рентгеновского излучения. Из рис. 11 видно, что электронная концентрация превышает невозмущённый уровень в  $10 \div 100$  раз на высотах  $65 \div 80$  км за счёт дополнительной ионизации рентгеновским излучением.

## ВЫВОДЫ

1) На среднеширотных трассах с различной протяжённостью и ориентацией в пункте приёма г. Ростов-на-Дону, покрывающих большую часть евро-азиатского континента, на частотах от 5 до 21,6 МГц во время мощной рентгеновской вспышки в 09:40 UT 24 сентября 2011 года класса X1.9 зарегистрировано синхронное уменьшение уровня сигнала на  $35 \div 65$  дБ на всех контролируемых частотах. Блэкаут продолжался от 7 мин на высоких частотах до 20 мин на низких частотах. Амплитуда принимаемого сигнала на переднем фронте блэкаута спадала со скоростью  $-0,5568$  дБ/с (характерное время релаксации около 17,96 с). На заднем фронте восстановления сигнала наблюдались два участка с различными временами релаксации. На первом участке амплитуда возрастает со скоростью  $0,09353$  дБ/с (характерное время релаксации 106,9 с), на втором, более позднем, участке амплитудный фронт нарастает со скоростью  $0,044857$  дБ/с (характерное время релаксации 222,9 с).

2) В 13:18 UT 24 сентября 2011 года наблюдалась повторная рентгеновская вспышка класса M7.1 и связанный с ней блэкаут категории R2. Значительное ослабление амплитуды контролируемых сигналов на величину около 50 дБ фиксировалось только на низких частотах (4 996 кГц, трасса Москва—Ростов-на-Дону).

3) Установлено, что за несколько минут до блэкаута на всех среднеширотных трассах наблюда-

ется синхронное резкое возрастание доплеровского смещения частоты контролируемых сигналов. Всплеск доплеровского смещения частоты зависит от класса вспышки и для класса X1.9 достигает  $15 \div 20$  Гц. Далее следуют квазипериодические флуктуации доплеровского смещения частоты с периодами  $20 \div 30$  с и убывающей амплитудой. Первый максимум смещения частоты совпадает с моментом времени максимальной скорости изменения потока рентгеновского излучения. Эта особенность является предвестником как сильного, так и более слабого блэкаута, например, категории R2.

4) Исследовано изменение во времени модельных профилей электронной концентрации в нижней ионосфере, рассчитанных по результатам измерения напряжённости поля дециметровых радиоволн на трассе Москва–Ростов-на-Дону во время рентгеновской вспышки, произошедшей в 09:40 UT 24 сентября 2011 года. Показано, что в момент максимального потока рентгеновского излучения электронная концентрация в нижней ионосфере заметно увеличилась (относительное увеличение достигало  $10^2$ ). Этот факт хорошо согласуется с ранее полученными нами результатами. Эффект блэкаута наблюдался на всём евро-азиатском континенте, поэтому можно утверждать, что во время рентгеновских вспышек электронная концентрация в нижней ионосфере повышалась в  $10 \div 100$  раз в этом регионе глобально.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 12-02-00177-а).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Митра А. Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли. М.: Мир, 1977. 370 с.
2. Вертоградов Г. Г., Урядов В. П., Вертоградов В. Г. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 1. С. 1.
3. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. М.: Мир, 1973. 502 с.
4. Намазов С. А., Новиков В. Д., Хмельницкий И. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 1975. Т. 18, № 4. С. 473.
5. Вертоградов Г. Г., Урядов В. П., Вертоградов В. Г., Шевченко В. Н. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2007. Т. 12, № 5. С. 25.
6. Вертоградов Г. Г., Урядов В. П., Вертоградов В. Г. и др. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2010. Т. 15, № 5. С. 22.
7. Валов В. А., Вертоградов Г. Г., Вертоградов В. Г. и др. // Физические основы приборостроения. 2012. Т. 1, № 4. С. 24.
8. Вертоградов Г. Г., Урядов В. П., Вертоградов В. Г. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 5. С. 287.
9. [www.sec.noaa.gov](http://www.sec.noaa.gov).
10. Барабашов Б. Г., Вертоградов Г. Г. // Математическое моделирование. 1996. Т. 8, № 2. С. 3.

Поступила в редакцию 27 декабря 2013 г.; принята в печать 12 февраля 2014 г.

### IONOSPHERIC EFFECTS OF THE X-RAY FLARES OF SEPTEMBER 24, 2011 ACCORDING TO OBLIQUE SOUNDING DATA

*G. G. Vertogradov, E. G. Vertogradova, and V. P. Uryadov*

We present the results of observations of a sudden wideband attenuation of short radio waves and Doppler-shift variations of the signals from broadcast stations on oblique sounding paths in the

Eurasian longitudinal sector during a series of X-ray flares that occurred on September 24, 2011. The results of modeling of the electron-density profiles in the lower ionosphere based on measurements of attenuation of short waves on the Moscow—Rostov-on-Don path at a frequency of 9996 kHz of the RVM exact-time station during the most powerful flare that occurred on September 24, 2011 at 09:40 UT are given.