

УДК 550.338.2

## ОТКЛИК НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРЫ НА ГЕОМАГНИТНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ НА ВЫСОТАХ НИЖЕ МАКСИМУМА СЛОЯ $F_2$ В СЕНТЯБРЕ И АПРЕЛЕ 2005 г.

© 2012 г. Г. П. Кушнаренко, Г. М. Кузнецова, К. Г. Ратовский, О. Е. Колпакова

ФГБУ науки Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск

e-mail: kusch@iszf.irk.ru

Поступила в редакцию 03.06.2010 г.

После доработки 29.07.2011 г.

Проведен анализ ионосферных данных во время геомагнитных возмущений в апреле и сентябре 2005 г. с целью получения информации о поведении некоторых параметров ионосферы на высотах слоя  $F_1$ . Используются результаты измерений Иркутского дигизонда по часовым, 5- и 15-минутным интервалам времени. Показано, что в сентябре все параметры очень активно откликаются на геомагнитные возмущения в короткие интервалы времени измерений. Показано, что электронная концентрация ведет себя более стабильно на нижних высотах слоя  $F_1$  как во время сильных, так и во время умеренных возмущений.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Высокая степень изменчивости — одна из основных характеристик возмущенной ионосферы. Каждая геомагнитная буря развивается по-своему благодаря разным и многим взаимодействующим факторам. Данные наблюдений показывают, что нет прямой простой связи между интенсивностью магнитной бури и величиной ионосферного отклика. Сложным образом этот отклик зависит в данном месте от местного времени, сезона, времени начала геомагнитной бури.

Цель настоящей работы — выяснить различия реакции электронной концентрации в слое  $F_1$  на геомагнитные возмущения в сравнении с изменениями электронной концентрации в максимуме слоя  $F_2$  ( $NmF_2$ ) в одни и те же периоды возмущений.

Дневное поведение слоя  $F_1$  согласно работам [Buresova and Lastovicka, 2001; Lastovicka, 2002] в течение геомагнитной бури стремится к большей стабильности по сравнению со значительными изменениями электронной концентрации в  $F_2$ -слое.

Обычно выводы о стандартном дневном поведении параметров  $F$ -области основаны на результатах анализа часовых наблюдений. Другие наблюдения показывают, что очень часто изменения в слое  $F_1$  происходят в небольшие интервалы времени внутри почасовых периодов. В нашем распоряжении имелись 5-минутные измерения для сентября и 15-минутные измерения для апреля 2005 г., выполненные на дигизонде ст. Иркутск. Используя результаты этих измерений, мы провели анализ поведения параметров  $F$ -области во

время сильных геомагнитных возмущений в сентябре и в условиях умеренного возмущения в апреле.

Геофизические условия сентября были очень разнообразны. Солнечная активность представлена индексом  $F10.7 = 75–120$ . Большой интерес представляет период с 7 по 15 сентября. В начале этого периода произошла мощная вспышка на Солнце, а через сутки — еще три вспышки. В следующие дни вплоть до 17 сентября вспышки регистрировались ежедневно. Информация о рентгеновском излучении во время вспышек, о значениях  $Dst$ - и  $Ap$ -индексов была получена на сайтах (<http://sec.noaa.gov>) и (<http://swdcd.db.kugi.kyotou.ac.jp/dstdir>). Значения этих индексов показывают практически спокойные геомагнитные условия 7 и 8 сентября. В то же время обнаружены большие потоки рентгеновского излучения с 7 по 9 сентября, максимальные величины которых были зарегистрированы 7 сентября в 17:30–17:50 и 8 сентября в 21:05–21:30 UT. В этот же день наблюдалось несколько вспышек меньшей интенсивности. 9 и 10 сентября увеличились значения  $Ap$ -индекса. В результате 10 сентября началась магнитная буря со значением  $Dst$ -индекса в максимуме 11 сентября — 147 нТл. Эта буря имела длительную фазу восстановления, во время которой 15 и 16 сентября происходили более слабые магнитные возмущения.

Согласно работам [Гвишвили и др., 2005; Фридман, 1963; Хинтереггер, 1962] во время рентгеновских вспышек на Солнце интенсивность потока излучения в ультрафиолетовом диапазоне меняется не больше, чем на единицы про-

ентов. В рентгеновском диапазоне поток возрастает в десятки и сотни раз.

Область  $F$  поглощает интервал длин волн 200–850 Å, причем значительный вклад дает рентгеновское излучение. Главной причиной ионизации и нагрева слоя  $F1$  является излучение в диапазоне (400–260) Å, а интервал (260–166) Å – важный источник ионизации в слоях  $F1$  и  $E$ . Во время вспышки область длин волн (100–910) Å поглощается ниже 220 км (за исключением нескольких резонансных полос). Максимальное поглощение этого участка спектра происходит на высоте 180 км. Имея в виду все эти сведения об интервалах длин волн, ионизирующих разные области ионосферы, можно предположить, что во время солнечных вспышек в сентябре повышается также и интенсивность диапазона длин волн, воздействующего на электронную концентрацию на высотах слоя  $F1$ .

## 2. ИЗМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ С ВЫСОТОЙ ВО ВРЕМЯ ВОЗМУЩЕНИЙ В АПРЕЛЕ И СЕНТЯБРЕ 2005 г.

Исследование возмущений электронной концентрации  $Ne$  было проведено на высотах ионосферы  $h = 150, 170, 190$  км и  $h = hmF2$ , где  $hmF2$  – высота максимума электронной концентрации слоя  $F2$ . Рассматривались два периода: с 1 по 20 апреля 2005 г. и с 1 по 20 сентября 2005 г. Возмущение отсчитывалось от невозмущенного уровня  $Nref$ , в качестве  $Nref$  было выбрано среднее значение  $Ne$  по вышеуказанным интервалам. Анализировалось среднедневное относительное возмущение электронной концентрации  $\Delta Ne$ , рассчитываемое по формуле

$$\Delta Ne = \frac{\langle Ne \rangle - \langle Nref \rangle}{\langle Nref \rangle} 100\%,$$

где знак  $\langle \rangle$  – означает усреднение по временному интервалу 10:00–14:00 LT [Щепкин и др., 2009].

Зависимости возмущений  $\Delta Ne$  от дня месяца представлены на рисунках 1 и 2. Из рисунка 1 видно, что в апреле диапазон вариаций  $\Delta Ne$  монотонно сокращается с высотой и составляет:  $-43\%$ – $+31\%$  для  $h = hmF2$ ;  $-33\%$ – $+18\%$  для  $h = 190$  км;  $-18\%$ – $+8\%$  для  $h = 170$  км и  $-11\%$ – $+6\%$  для  $h = 150$  км. Наибольшие положительные возмущения наблюдались с 1 по 4, а также 6, 11 и 18 апреля. С 1 по 4, а также 11 апреля геомагнитная обстановка была спокойной ( $Dst > -22$  нТл), а 6 и 18 апреля – слабо возмущенной ( $Dst = -35$  нТл). Для высоты  $hmF2$  наибольшее возмущение наблюдалось 18 апреля и составляло 31%, а для высоты 190 км – 2 апреля (18%). Для высот 150 и 170 км положительное возмущение не превышало 10%. Наибольшие (по амплитуде) отрицательные возмущения наблюда-

лись 5, 7, 12 и 13 апреля. Во время возмущений 5, 12 и 13 апреля геомагнитная обстановка была умеренно возмущенной ( $Dst = -85, -70$  и  $-53$  нТл соответственно), а для возмущений 7 апреля – слабо возмущенной ( $Dst = -37$  нТл). Для всех высот наиболее сильное отрицательное возмущение наблюдалось 5 апреля и составляло  $-11\%$ ,  $-18\%$ ,  $-33\%$  и  $-43\%$  для 150, 170, 190 км и  $hmF2$  соответственно.

Из рисунка 2 видно, что в сентябре так же, как и в апреле, диапазон вариаций  $\Delta Ne$  монотонно сокращается с высотой и составляет:  $-37\%$ – $+32\%$  для  $h = hmF2$ ;  $-23\%$ – $+28\%$  для  $h = 190$  км;  $-12\%$ – $+21\%$  для  $h = 170$  км и  $-12\%$ – $+12\%$  для  $h = 150$  км. Наибольшие положительные возмущения наблюдались 2, 8–11, 15 и 18–20 сентября. В отличие от апреля, в сентябре положительные возмущения наблюдались при различных уровнях геомагнитной возмущенности. С 8 по 10 сентября геомагнитная обстановка была спокойной ( $Dst > -30$  нТл); 2, 15 и 18–20 сентября – слабо возмущенной  $Dst = -(40-48)$  нТл; а 11 сентября – сильно возмущенной (основная фаза геомагнитной бури с пиковым значением  $Dst = -147$  нТл). Для высоты  $hmF2$  наибольшее возмущение наблюдалось 19 сентября и составляло 32%. Для высот 150, 170 и 190 км наибольшее возмущение наблюдалось 9 сентября и составляло 12%, 21% и 28% соответственно. Характерно, что  $\Delta Ne$  на высотах 170 и 190 км превышало  $\Delta Ne$  на высоте  $hmF2$  (15%). Такая особенность может объясняться вспышечной активностью Солнца, и как следствие, повышенным уровнем рентгеновского излучения. Во время геомагнитной бури 11 сентября возмущение на высоте  $hmF2$  было положительным, тогда как на высотах 150, 170 и 190 км – отрицательным ( $-5\%$ ,  $-6\%$  и  $-10\%$  соответственно). Наибольшие (по амплитуде) отрицательные возмущения наблюдались 1, 3, 5, 12, 13 и 16 сентября. За исключением 3 сентября во всех случаях геомагнитная обстановка была умеренно возмущенной,  $Dst = -(58-85)$  нТл, а 3 сентября – слабо возмущенной,  $Dst = -48$  нТл. Для всех высот наиболее сильные отрицательные возмущения наблюдались в начале месяца: 1 сентября для  $h = hmF2$  ( $-37\%$ ), 3 сентября для  $h = 190$  км ( $-23\%$ ) и 5 сентября для  $h = 170$  и 150 км ( $-12\%$ ).

Таким образом, общей особенностью возмущений для обоих месяцев является монотонное сокращение диапазона вариаций  $\Delta Ne$  с высотой, т.е. в целом  $F2$ -слой ионосферы является более возмущенным по сравнению  $F1$ -слоем. Тем не менее, в отдельные дни (9 и 13 сентября, 3–4 апреля) более сильное возмущение наблюдалось в  $F1$ -слое. Возможной причиной является повышение уровня рентгеновского излучения накануне геомагнитных возмущений. Для обоих месяцев наибольшие (по амплитуде) отрицательные возмущения наблюдаются, как правило, в условиях

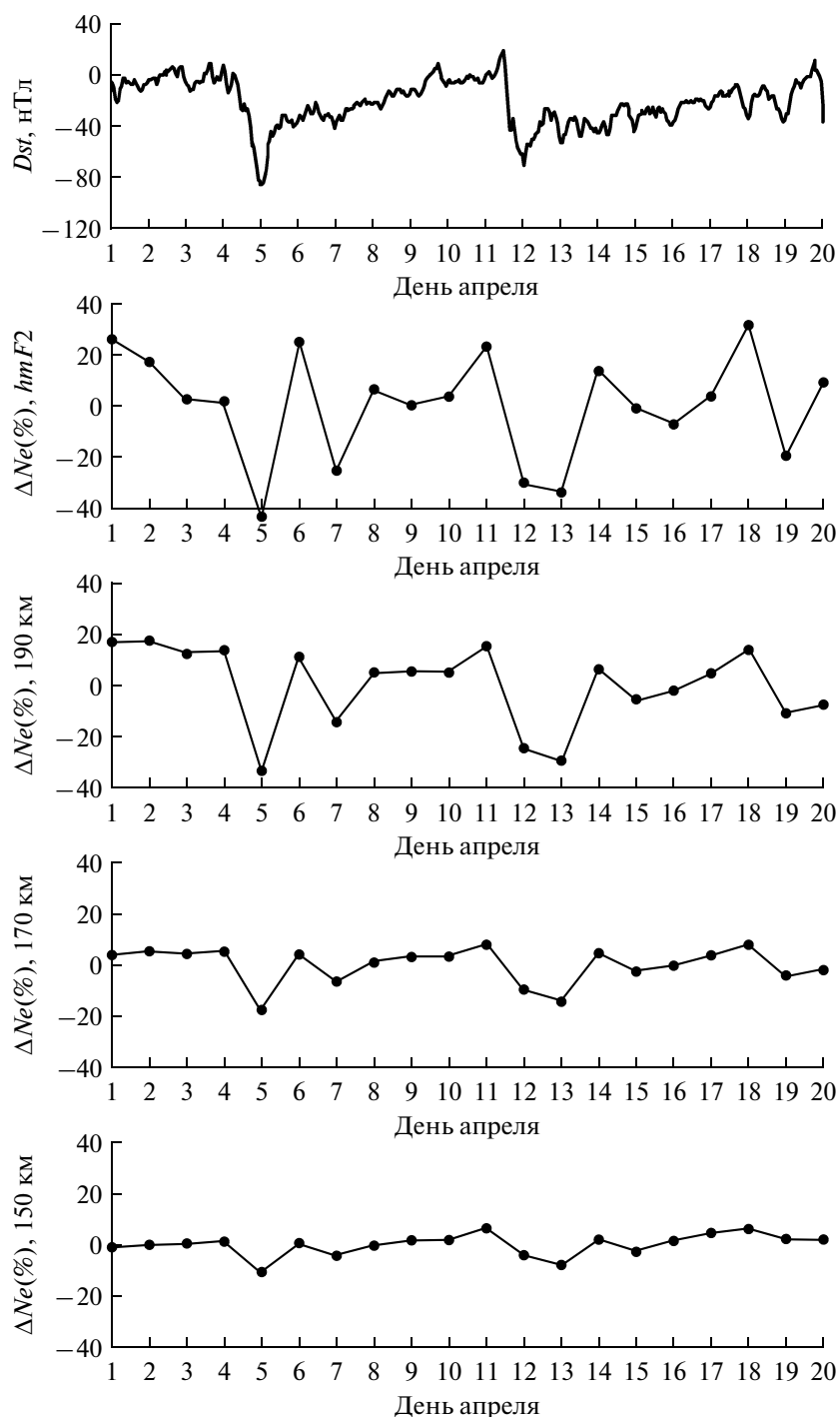


Рис. 1. Зависимости возмущений  $\Delta Ne$  на трех высотах и высоте максимума  $F2$ -слое от дня месяца (апрель 2005 г.)

умеренной геомагнитной возмущенности,  $Dst = -(53-85)$  нТл. Для положительных  $\Delta Ne$  имеет место другая картина. Если в апреле наибольшие положительные возмущения наблюдались для спокойной либо слабо возмущенной геомагнитной обстановки, то в сентябре сильные возмущения наблюдались при всех уровнях геомагнитной активности. Такая особенность может объясняться

сезонной зависимостью сценария геомагнитных бурь [Prolss, 1993; Vuonsanto, 1999; Mikhailov, 2000]: в летнее дневное время во время геомагнитных возмущений преобладают отрицательные возмущения электронной концентрации, в то время как зимой днем – положительные. В этом смысле апрельская картина демонстрирует признаки летнего сезона, а сентябрьская – зимнего.

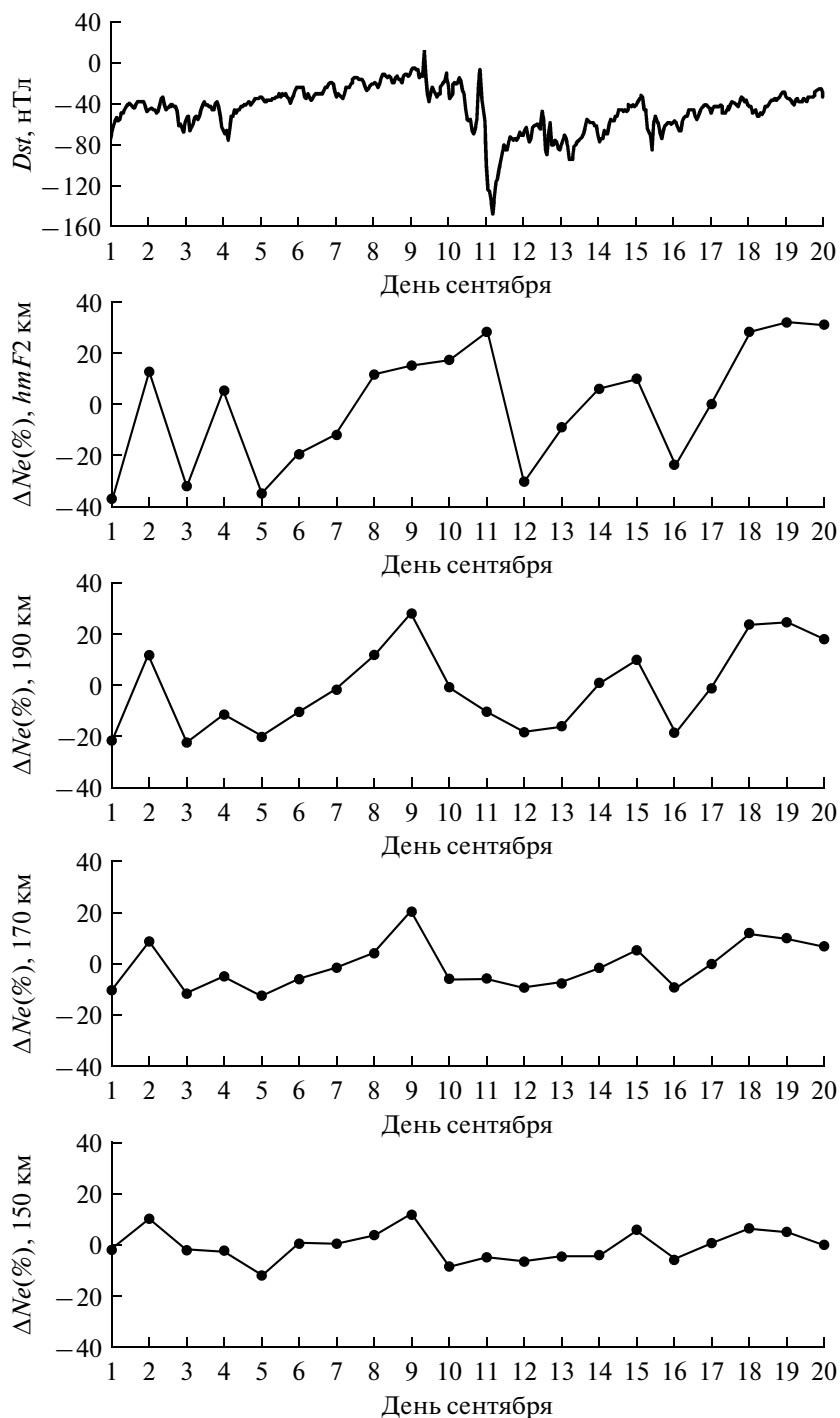


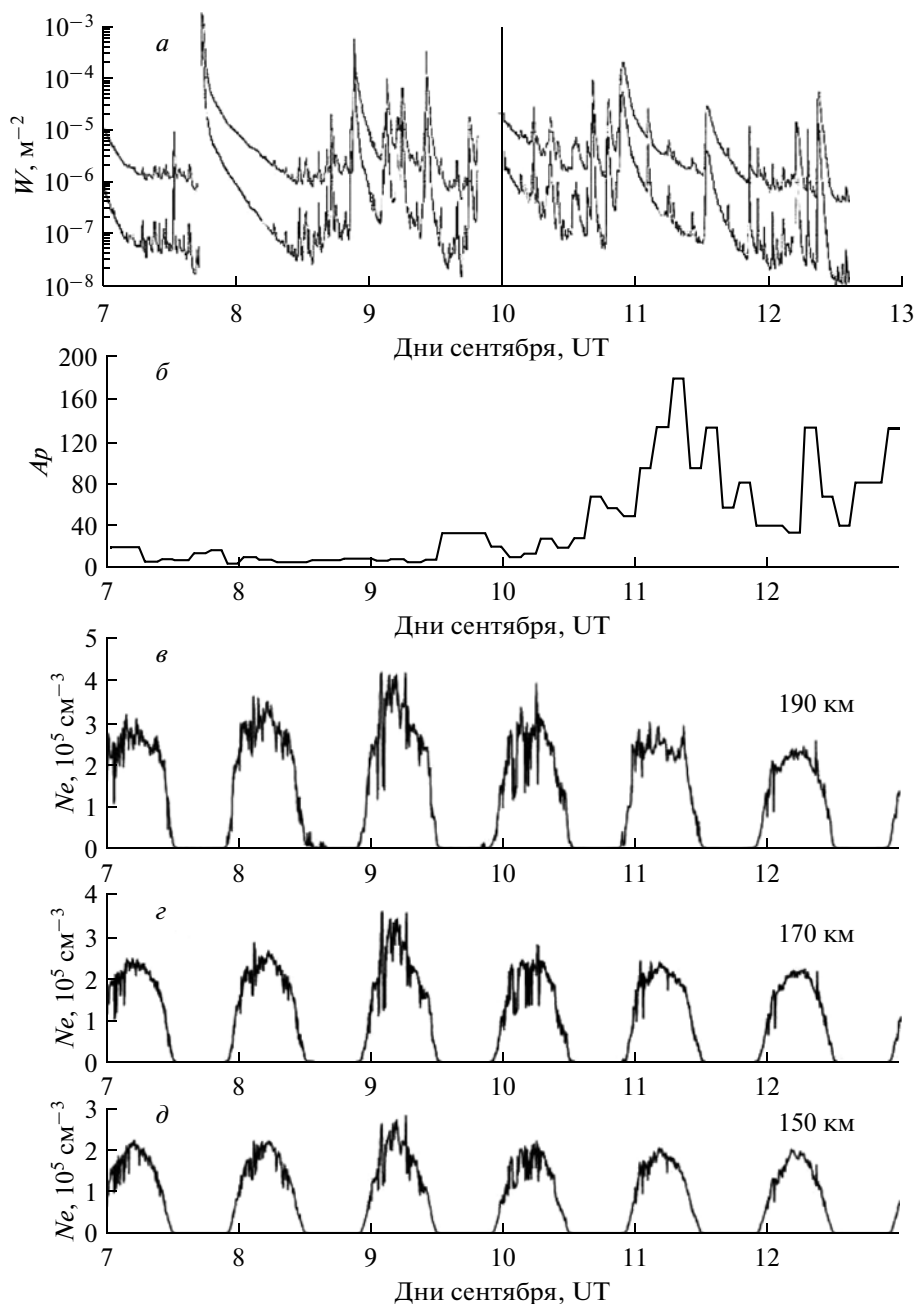
Рис. 2. Зависимости возмущений  $\Delta Ne$  на трех высотах и высоте максимума слоя  $F2$  от дня месяца (сентябрь 2005 г.)

### 3. ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРЫ В ВОЗМУЩЕННЫЕ ПЕРИОДЫ (5- И 15-МИНУТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ)

#### 3.1. Электронная концентрация (сентябрь)

Значения  $A_p$ - и  $Dst$ -индексов показывают практически спокойные геомагнитные условия 7

и 8 сентября. В то же время с 7 по 9 сентября наблюдались большие потоки рентгеновского излучения. 9 и 10 сентября увеличились значения  $A_p$ -индекса. Мы исследовали поведение электронной концентрации во время возмущений в сентябре, используя 5-минутные измерения Иркутского дигизонда. Результаты приведены на рисунках 3 и 4, где показаны изменения  $Ne$  с 7 по



**Рис. 3.** *a* – вариации интенсивности потоков рентгеновского излучения в двух диапазонах: 1.0–8.0 Å (верхняя кривая) и 0.5–4.0 Å (нижняя кривая) с 7 по 12 сентября 2005 г.; *б* – вариации 3-часового  $A_p$ -индекса в этот же период; *в*, *г*, *д* – изменение  $N_e$  на трех высотах (5-минутные измерения).

12 сентября на трех высотах: 190, 170 и 150 км. Более подробно дневное изменение  $N_e$  на этих высотах представлено на рис. 4 для трех дней: 9, 10 и 11 сентября. Начальная стадия развития возмущения 9 сентября в Иркутске приходится на вечерний период по местному времени. На фоне спокойной геомагнитной обстановки электронная концентрация должна бы показывать обычное дневное изменение, однако на рисунках совершенно другая картина. Значения  $N_e$  9 сентяб-

ря увеличились на всех высотах по сравнению со значениями в предыдущий день. В поведении этого параметра характерны резкие изменения в короткие временные интервалы: с 8:10 до 9:20 LT на высоте 190 км электронная концентрация по абсолютной величине изменилась в 4.5 раза – (с 4.5 до  $1.0 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ ); на высоте 170 км – в 3.5 раза (с 3.6 до  $1.1 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ ); на 150 км – в 2.5 раза (с 2.7 до  $1.1 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ ). Как отмечалось выше, в часы, соответствующие ночному и раннему утреннему

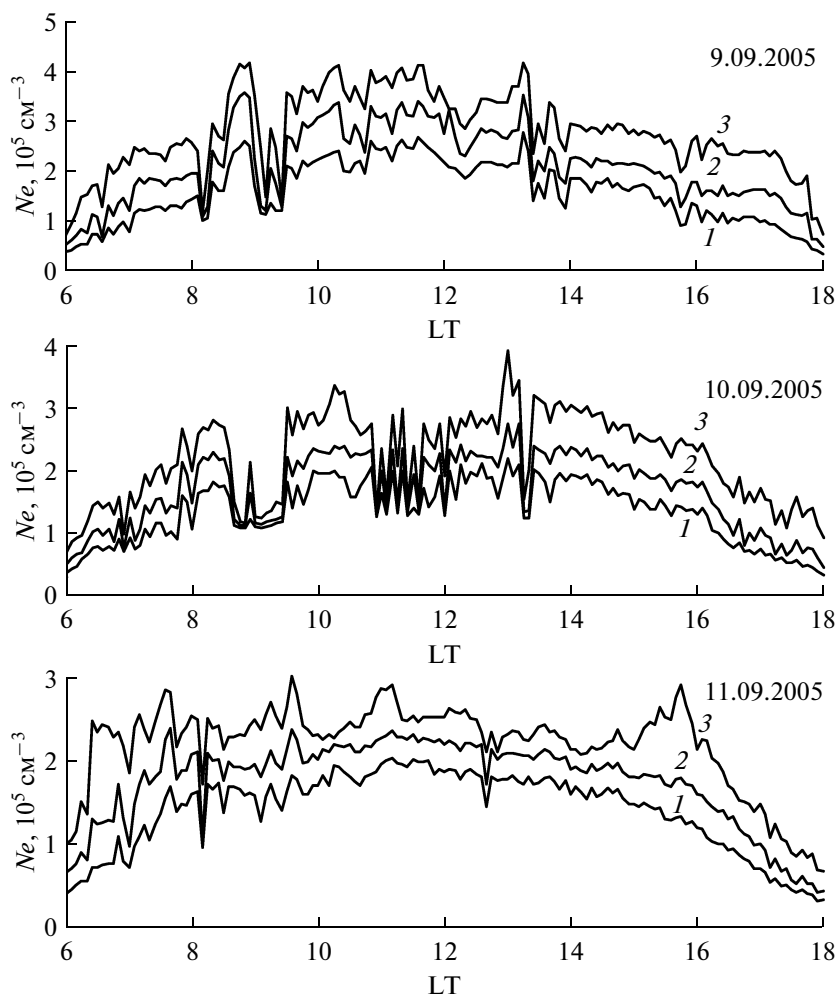


Рис. 4. Изменения  $N_e$  для трех дней сентября на высотах 150 км (1), 170 км (2), 190 км (3), (5-минутные измерения).

времени, в Иркутске 9 сентября, зарегистрированы большие потоки рентгеновского излучения от мощной вспышки на Солнце, и в течение этого дня наблюдались вспышки меньшей интенсивности. На рисунке 3а для иллюстрации показаны вариации интенсивности потоков рентгеновского излучения в двух диапазонах: 1.0–8.0 Å (верхняя кривая) и 0.5–4.0 Å (нижняя кривая) с 7 по 12.09.2005 г. На рисунке 3б приведены изменения  $A_p$ -индекса в этот же период. Возможно, это вызвало увеличение интенсивности потока энергии в тех интервалах и линиях длин волн, которые воздействуют на ионосферу на высотах слоя  $F1$ , что и явилось причиной сильных флуктуации в дневном поведении 5-минутных значений  $N_e$  9 сентября. По мере развития геомагнитного возмущения 10 сентября абсолютные значения  $N_e$  уменьшились на всех высотах в  $\sim 1.5$  раза в сравнении с  $N_e$  на этих высотах 9 сентября. Можно выделить период 10.09.2005 г. с 8:45 до 9:30 LT, когда значения  $N_e$  на всех трех высотах почти одинаковы и заключены в интервале  $(1.1\text{--}1.5) \times 10^5 \text{ см}^{-3}$ .

11 сентября геомагнитное возмущение в Иркутске достигает своей максимальной фазы в 20:00 LT. Абсолютные значения  $N_e$  продолжают уменьшаться в сравнении с предыдущим днем 10.09.2005 г. Большие вариации в дневных значениях  $N_e$  присутствуют во все возмущенные дни и на всех высотах.

### 3.2. Параметры $foF1$ и $hmF1$ (сентябрь)

Значения критической частоты слоя  $F1$  во время возмущений меняются слабо, варьируя в пределах  $4 \pm (0.1\text{--}0.3)$  МГц. Периоды сильного поглощения или экранирования нижележащими слоями, вызывающие отсутствие значений  $foF1$ , встречаются 9 сентября: с 8:15 до 9:00 и с 9:30 до 13:25 LT. Небольшие промежутки времени (около часа или меньше), когда отсутствуют значения  $foF1$ , характерны для всего возмущенного периода.

Для определения изменений другого параметра — высоты максимума  $F1$ -слоя во время возмущений для сравнения был выбран спокойный

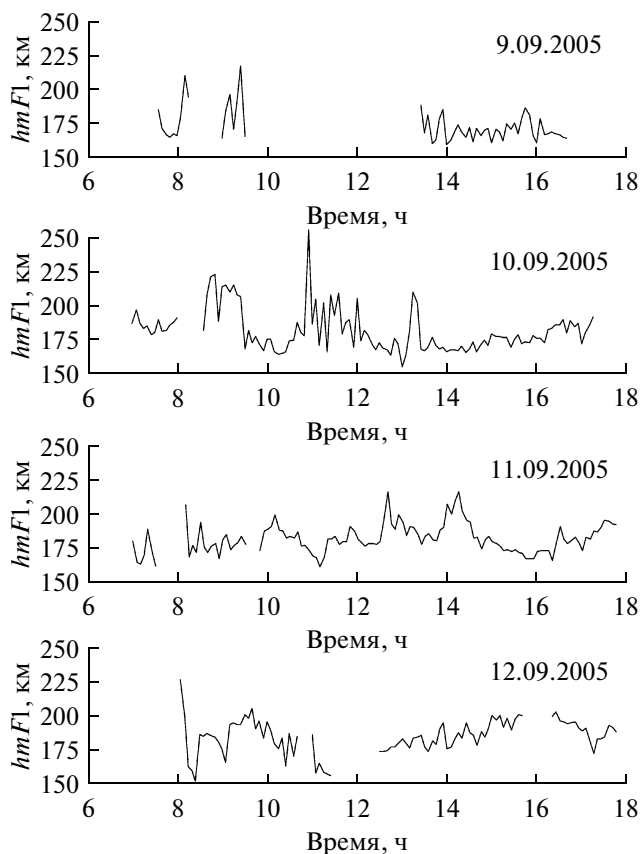


Рис. 5. Изменение высоты максимума слоя  $F1(hmF1)$  9, 10, 11, 12 сентября 2005 г. (5-минутные измерения).

день – 20 сентября ( $A_p = 6$ ). В этот день средняя величина  $hmF1$  за околополуденный период (10:00–14:00 LT) составляет 170 км [Щепкин и др., 2009]. В период возмущений отклонения аналогичного значения  $hmF1$  от этого среднего таковы: –10; 7; 18; 16; 14; 4; –9; 16; 6 км для дней 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16 и 17 сентября соответственно (рис. 5). Наибольшие отклонения приходятся на дни максимального развития возмущения. Сильно меняется этот параметр в 5-минутные интервалы. Часовые измерения  $hmF1$  не отслеживают такие изменения: 9 сентября с 8:00 до 9:20 LT высота максимума повышается от 170 до 220 км. В этот же промежуток времени резко возрастает  $Ne$  на всех рассматриваемых высотах (см. рис. 4). Очень интенсивны вариации параметра  $hmF1$  в период с 8:35 до 13:30 LT 10.09.2005 г.: от значения 160 до 260 км. 11 сентября изменения в течение дня меньше: от 160 до 220 км. Максимальная фаза возмущения в Иркутске приходится на вечерние и ночные часы LT 11.09.2005 г., поэтому ответом на возмущение является отсутствие значений  $hmF1$  в утренние часы 12 сентября и значение 225 км в 8:00 LT, а в 8:10 LT высота  $hmF1 = 150$  км. Далее в течение дня встречается несколько периодов отсутствия значений  $hmF1$  из-за поглощения.

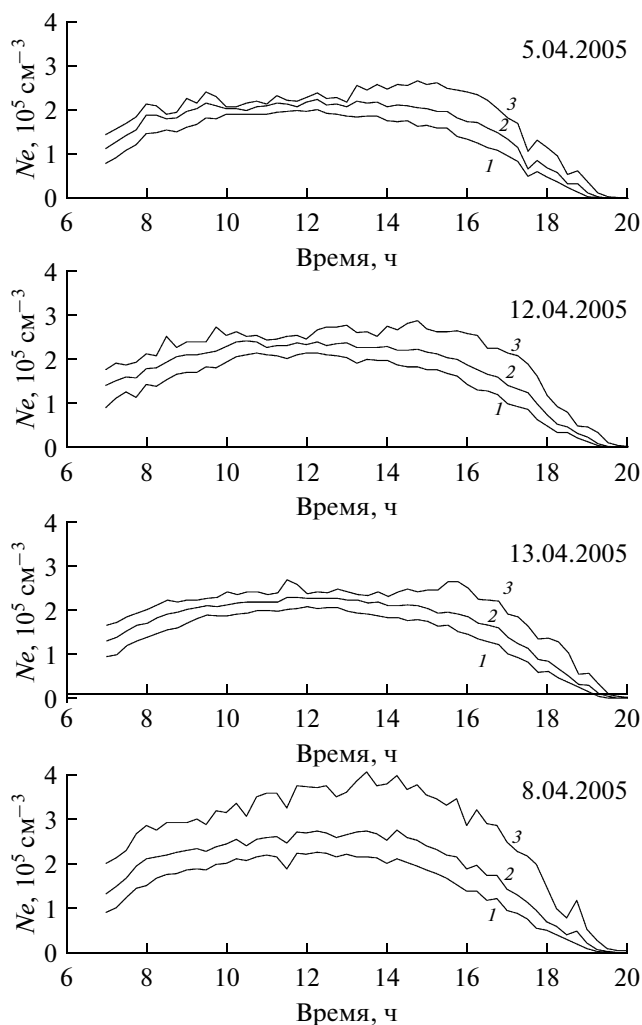


Рис. 6. Изменение  $Ne$  в дни возмущений 5, 12 и 13 апреля и в спокойный день 8 апреля 2005 г. на высотах 150 км (1), 170 км (2), 190 км (3), (15-минутные измерения).

### 3.3. Изменение параметров слоя $F1$ (апрель)

Рассмотрено поведение аналогичных параметров области  $F$  во время умеренных по силе возмущений в апреле 2005 г.: 5 апреля среднесуточное значение индекса  $A_p = 50$ , 12–13 апреля  $A_p = 30$ . Изменения электронной концентрации для этих трех дней (15-минутные измерения) в сравнении со спокойным днем 8 апреля ( $A_p = 3$ ) показаны на рис. 6. Отсутствуют значительные вариации в дневном поведении  $Ne$  характерные для возмущений в сентябре 2005 г. В сравнении со спокойным днем 8 апреля ( $A_p = 3$ ) отмечается уменьшение электронной концентрации до 30–40% на высоте 190 км, до 20–30% – на 170 км и меньше 10% – на 150 км, т.е. реакция  $Ne$  уменьшается с понижением высоты. Таким образом, измерения в короткие интервалы времени в дни возмущений в апреле не показывают значительных изменений в поведении электронной концентрации на рассматриваемых высотах.

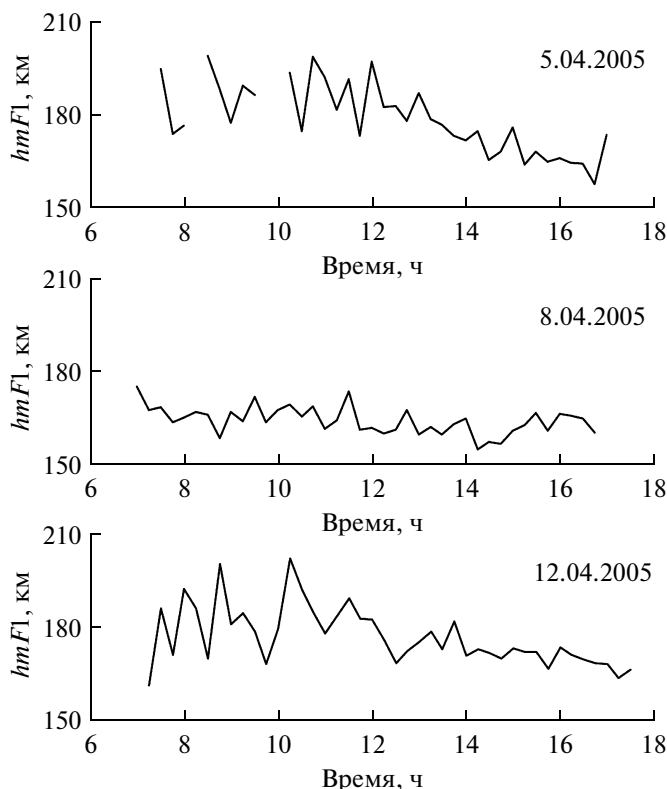


Рис. 7. Изменение высоты максимума слоя  $F1$  ( $hmF1$ ) для трех дней апреля 2005 г. (8 апреля – спокойный день).

Параметр  $foF1$  почти не откликается на возмущения в апреле. Высота максимума  $hmF1$  заметно увеличивается в сравнении со средним значением 161 км за период (10:00–14:00 LT) 8 апреля (рис. 7): отклонения составляют 24, 15 и 19 км для 5, 12, и 13 апреля соответственно. Гораздо интенсивнее меняется высота  $hmF1$  по 15-минутным измерениям: от 170 до 195–200 км 5 и 12 апреля.

#### 4. ВЫВОДЫ

Анализ среднедневных относительных возмущений электронной концентрации в апреле и сентябре 2005 г. дал следующие результаты.

1. Общей особенностью возмущений для этих месяцев является монотонное сокращение диапазона вариаций  $\Delta Ne$  с высотой, т.е. в целом  $F2$ -слой ионосферы является более возмущенным по сравнению  $F1$ -слоем. Тем не менее, в отдельные дни (9 и 13 сентября, 3–4 апреля) более сильное возмущение наблюдалось в  $F1$ -слое. Возможной причиной этого является повышение уровня рентгеновского излучения накануне геомагнитных возмущений. Для обоих месяцев наибольшие (по амплитуде) отрицательные возмущения наблюдаются, как правило, в условиях умеренной геомагнитной возмущенности,  $Dst = -(53–85)$  нТл. Для положительных  $\Delta Ne$  имеет место другая картина. Если в апреле наибольшие положительные возму-

щения наблюдались для спокойной либо слабо возмущенной геомагнитной обстановки, то в сентябре сильные возмущения наблюдались при всех уровнях геомагнитной активности. Такая особенность может объясняться сезонной зависимостью электронной концентрации от геомагнитной активности, когда в летнее дневное время во время геомагнитных возмущений преобладают отрицательные возмущения электронной концентрации, а в зимнее дневное время – положительные. В этом смысле апрельская картина демонстрирует признаки летнего сезона, а сентябрьская – зимнего.

2. Сильно меняются абсолютные значения  $Ne$  (по 5-минутным измерениям) в сентябре: от 1.5 до 4 раз, причем в дневные часы значительная флуктуация  $Ne$  на высотах слоя  $F1$  характерна для всего периода возмущений. В апреле такого поведения  $Ne$  не наблюдается. Активно отвечает на возмущения в апреле и сентябре высота максимума слоя  $F1$  ( $hmF1$ ): за 5–15 мин ее величина может измениться в пределах  $\pm 80$  км. Часовые измерения  $hmF1$  не отслеживают такую реакцию на события.

Можно предположить, что совместное влияние энергии солнечных вспышек и геомагнитных возмущений, характерных для сентября, вносит свой вклад в интенсивный отклик некоторых ионосферных параметров на возмущения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гвишвили Г.В., Иванов-Холодный Г.С., Лещенко Л.К., Чертопруд В.Е. Солнечные вспышки и газовый состав верхней атмосферы // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 45. № 2. С. 263–267. 2005.
- Фридман Г. Ионизирующее излучение Солнца. Физика верхней атмосферы. М.: Физматлит, 504 с. 1963.
- Хинтереггер Х.Е. Предварительные результаты наблюдения далекого ультрафиолетового спектра Солнца в верхней атмосфере / Ультрафиолетовое излучение Солнца и межпланетная среда. М.: изд-во Иностранной литературы, 432 с. 1962.
- Шепкин Л.А., Кушнаренко Г.П., Кузнецова Г.М. Возмущения в области  $F1$  ионосферы в апреле 2005 г. // Солнечно-земная физика. Вып. 13. С. 30–33. 2009.
- Buonsanto M.J. Ionospheric Storms: a review // Space Sci. Rev. V. 88. № 3/4. P. 563–601. 1999.
- Buresova D., Laštovička J. Changes in the  $F1$  region electron density during geomagnetic storms at low solar activity // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 63. № 5. P. 537–544. 2001.
- Laštovička J. Monitoring and forecasting of ionospheric space weather-effects of geomagnetic storms // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 64. № 5–6. P. 697–705. 2002.
- Mikhailov A.V. Ionospheric  $F2$ -layer storms // Fisica de la Tierra. V. 12. P. 223–262. 2000.
- Prolls G.W. On explaining the local time variation of ionospheric storm effects // Ann. Geophysicae. V. 11. № 1. P. 1–9. 1993.
- [http://sec.noaa.gov]
- [http://swdcd.db.kugi.kyotou.ac.jp/dstdir]