

ВОЗМУЩЕНИЯ В ОБЛАСТИ F1 ИОНОСФЕРЫ В АПРЕЛЕ 2005 г.

Л.А. Щепкин[†], Г.П. Кушнаренко, Г.М. Кузнецова

DISTURBANCES IN THE IONOSPHERIC REGION F1 IN APRIL 2005

L.A. Shchepkin[†], G.P. Kushnarenko, G.M. Kuznetsova

Анализируются проявления ионосферных возмущений на высотах от 120 км до высоты максимума h_m слоя F2. Рассмотрены геомагнитные возмущения 5, 12 и 13 апреля 2005 г. Эти возмущения характеризуются выраженным синхронным понижением электронной концентрации по всему указанному высотному диапазону.

Оценены по методике авторов статьи полуденные изменения относительного содержания атомарного и молекулярного кислорода на высоте 120 км. Имеет место отчетливое понижение отношения концентраций атомарного кислорода и молекулярного азота при увеличении отношения концентраций молекул и атомов кислорода

Manifestations of ionospheric disturbances at heights between 120 km and the height h_m of F2-layer maximum are analyzed. Geomagnetic disturbances of 5, 12 and 13 April 2005 are examined. These disturbances are characterized by a pronounced synchronous decrease in electron density throughout the said altitude range.

The authors' technique is used to estimate midday variations of relative amount of atomic and molecular oxygen at 120 km. There is a distinct decrease in the ratio of atomic oxygen to molecular nitrogen concentrations as the ratio of oxygen molecule to oxygen atom concentrations increases.

Введение

Изучению эффектов возмущений в ионосфере уделяется большое внимание уже более полувека [1, 2]. Большой объем сведений получен по данным об электронной концентрации N_m F2 или критической частоте f_0 F2 в максимуме слоя F2 [3, 4]. До сих пор имеется крайне мало сведений о проявлениях эффектов возмущений в области F1 на высотах 150–200 км. Так, в работе [5] изучались подобные проявления по измерениям на среднеширотных ионосферных обсерваториях в западноевропейской зоне для нескольких возмущений в апреле–мае и октябре–ноябре 1994, 1995 и 1997 гг., т. е. в период низкой солнечной активности. Основное внимание было сосредоточено на асимметрии проявления эффектов возмущений в весенний и осенний сезоны. Установлено, что не всегда изменения электронной концентрации N на 180 и 190 км синхронны с возмущенными вариациями N_m F2. Так, в главную фазу магнитного возмущения 22–24 ноября 1997 г. отмечалось положительное возмущение в N_m F2 и в то же время наблюдалось понижение N на высотах 180 и 190 км. Во время апрельских и майских возмущений при сильно выраженным понижении N_m F2 наблюдались только слабые уменьшения N на 180 и 190 км.

Во всех случаях эффекты возмущений были слабо выражены на 170 км и почти не были заметны на более низких высотах. Авторы работы [5] предполагали продолжить эти исследования для периода высокой солнечной активности.

Отмеченные выше моменты иллюстрируют, насколько сложны и неоднозначны проявления эффектов возмущений в нижней части области F ионосферы. В настоящее время в Институте солнечно-земной физики СО РАН в Иркутске накапливается материал по измерениям электронной концентрации (N) в ионосфере с помощью цифрового ионозонда (дигизонда). Это позволяет приступить к детальному изучению эффектов возмущений в нижней части области F ионосферы. Имеющийся на сегодня в нашем распоряжении материал указанных измерений относится к низкой солнечной активности. В настоящей работе внимание сосредоточено на возмущениях

в апреле 2005 г. Этот год выделяется небольшим количеством возмущений, которые можно считать изолированными. Рассматриваются два возмущения в апреле 2005 г. Оба они связаны с магнитными возмущениями в первой половине апреля, которые были умеренными по величине. В первом из них среднесуточное значение планетарного индекса A_p было равно 36, во втором – 33. Несмотря на это, наблюдались хорошо выраженные отрицательные эффекты в ионосфере, которые характеризуются отчетливым понижением электронной концентрации на всех высотах области F.

В настоящей работе приводятся также оценки изменения относительного содержания атомов и молекул кислорода на базовом уровне термосферы 120 км. Оценки проведены по разработанной авторами статьи методике на основе измерений N .

Исходные данные. Реакция электронной концентрации на возмущение

В работе рассмотрены экспериментальные данные по электронной концентрации (N) в диапазоне высот от 120 км до высоты максимума слоя F2 в возмущенные (5, 12 и 13 апреля 2005 г.) и соседние с ними спокойные дни. Поскольку максимальные эффекты геомагнитной возмущенности отмечались в дневные по местному времени часы, то и эффект ионосферной возмущенности проявился в светлое время суток. На всех высотных уровнях в дневные часы наблюдалось понижение N . Этот эффект отчетливо проявился в диапазоне высот 120–220 км в поведении осредненных ежедневных значений N в интервале 10–14 ч LT (рис. 1). Кривая 3 (рис. 1, а) с минимальными значениями N соответствует возмущению 5 апреля, а кривые 4 и 5 (рис. 1, б) – возмущению 12 и 13 апреля.

В табл. 1 представлены для двух периодов 3–7 и 10–15 апреля 2005 г. значения индексов геомагнитного возмущения D_{st} . Минимальные значения приходятся на полуденные часы возмущенных дней 5, 12 и 13 апреля.

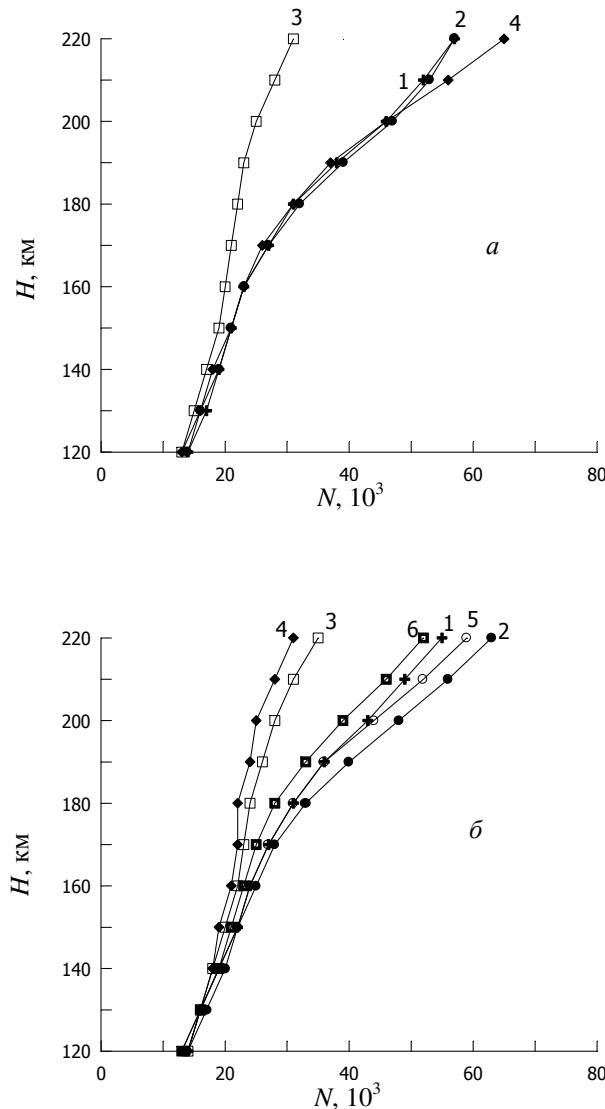


Рис. 1. Высотное изменение ежедневных значений электронной концентрации, осредненных в интервале 10–14 ч LT, за два периода апреля 2005 г.: а – 3–6 апреля (возмущение 5 апреля), б – 10–15 апреля (возмущение 12 и 13 апреля). Цифры на кривых обозначают дни в порядке их возрастания в соответствующие периоды.

Таблица 1

Индексы D_{st} за два периода (3–7 и 10–15 апреля 2005 г.) в дневные часы LT.

$d \setminus LT$	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
3–7 апреля 2005 г.													
3	-6	-1	5	6	6	-2	-5	-8	-9	-13	-12	-11	-7
4	-55	-4	-2	-4	-4	2	7	2	-8	-14	-12	-8	1
5	-37	-53	-57	-73	-82	-83	-85	-85	-84	-74	-63	-54	-51
6	-31	-36	-35	-40	-39	-38	-35	-31	-33	-35	-32	-28	-24
7	-20	-30	-33	-33	-37	-41	-37	-34	-32	-35	-35	-31	-26
10–15 апреля 2005 г.													
10	-4	-1	-3	-6	-9	-7	-5	-4	-6	-6	-6	-5	-5
11	-41	-3	-6	-7	-7	-4	0	1	2	0	-3	-2	1
12	-35	-52	-56	-59	-61	-62	-70	-62	-54	-54	-55	-50	-50
13	-39	-30	-29	-33	-38	-48	-53	-53	-46	-47	-41	-36	-34
14	-23	-41	-42	-44	-42	-45	-45	-43	-39	-37	-40	-46	-46
15	-29	-26	-32	-35	-42	-44	-42	-37	-32	-30	-28	-30	-30

Изменения электронной концентрации во время возмущений в сравнении со спокойными соседними сутками в дневное время представлены в данной работе как отклонения в (процентах) от средних за 21

день значений (± 10 дней с центром в данный день). Рассмотрены величины $dN = (N_{ex} - N_{av})/N_{av}$ в процентах для 170, 190, 220 км и высоты максимума слоя F2. Здесь N_{ex} – экспериментальные значения N , N_{av} – средние за 21 день N . Указанные значения dN приведены для возмущенных дней 5, 12 и 13 апреля 2005 г. и соседних с ними спокойных дней в табл. 2 и 3. Отчетливо видно различие в dN в спокойные и возмущенные дни: если в первые дни значения dN преимущественно равны единицам процентов, то в возмущенные они представляются десятками процентов, причем в сторону понижения N . Особо следует отметить синхронность в изменениях N на фиксированных высотах и в максимуме слоя F2. Максимальные по модулю значения dN отмечались 5 апреля в дополуденные часы, 12 и 13 апреля – в период 11–13 ч LT.

Таблица 2

Значения dN (в %) за период 3–7 апреля 2005 г. (возмущение 5 апреля) на трех высотах и на высоте максимума слоя F2.

$H \setminus LT$	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
км	Среднее dN за 3–4 апреля 2005 г.												
170	-15	-3	1	2	-1	5	6	8	2	2	-1	5	6
190	-8	0	7	4	6	17	10	10	0	4	2	4	9
220	5	3	10	5	4	15	3	1	-6	4	-6	-4	2
H_{mF2}	3	2	10	8	7	9	-4	-6	-11	0	-11	-6	-4
dN за 5 апреля 2005 г. (возмущение)													
170	-27	-17	-1	-10	-15	-19	-18	-20	-17	-11	-11	-13	-3
190	-45	-32	-19	-22	-30	-39	-38	-38	-29	-23	-21	-30	-24
220	-51	-50	-40	-35	-42	-49	-45	-42	-35	-30	-28	-41	-37
H_{mF2}	-39	-51	-41	-37	-61	-42	-43	-37	-36	-34	-30	-35	-25
Среднее dN за 6–7 апреля 2005 г.													
170	-4	-4	-5	-5	-2	1	-2	-4	-1	-4	-1	-4	-1
190	-7	0	-9	-10	-1	-4	-6	-12	-1	-6	-5	-2	-8
220	-1	-4	-4	-8	8	-11	-10	-8	5	-2	-4	1	-12
H_{mF2}	3	-4	-6	-7	13	-7	-12	3	3	-1	-2	0	-7

Таблица 3

Значения dN (в %) за период 10–15 апреля 2005 г. (возмущение 12 и 13 апреля).

$H \setminus LT$	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
км	Среднее dN за 10–11 апреля 2005 г.												
170	27	13	0	10	3	7	10	8	9	4	4	4	0
190	42	31	7	21	4	13	17	10	12	4	5	5	4
220	22	35	25	26	15	11	14	14	13	4	8	5	8
H_{mF2}	17	37	23	23	18	10	10	10	14	9	7	5	10
dN за 12 апреля 2005 г. (возмущение)													
170	-14	-3	-9	-7	-6	-11	-11	-8	-9	-7	-7	-12	-9
190	-20	-19	-19	-16	-20	-28	-29	-19	-20	-17	-14	-16	-26
220	-4	-32	-25	-22	-36	-41	-37	-29	-21	-28	-12	-13	-20
H_{mF2}	1	-18	-20	-20	-34	-38	-20	-29	-15	-22	-11	-11	-12
dN за 13 апреля 2005 г. (возмущение)													
170	-10	-12	-12	-10	-13	-14	-14	-14	-17	-12	-9	-13	2
190	-26	-23	-22	-21	-24	-29	-31	-29	-32	-23	-17	-25	-15
220	-37	-30	-27	-33	-35	-40	-47	-42	-28	-22	-27	-28	-22
H_{mF2}	-34	-29	-21	-33	-33	-37	-46	-33	-6	-14	-27	-25	-20
Среднее dN за 14–15 апреля 2005 г.													
170	-3	-2	0	1	8	2	4	1	-3	-1	3	4	4
190	-3	-10	-1	5	13	4	9	8	-1	4	5	9	8
220	-6	-9	1	6	12	10	16	11	12	17	13	25	15
H_{mF2}	-4	-5	2	5	13	13	12	7	16	18	22	30	35

Реакция термосферы

Интересно рассмотреть изменение газового состава во время возмущений в сравнении с соседними спокойными днями. Для этого мы воспользовались разработанной авторами статьи методикой оценки относительного содержания атомарного кислорода в

виде отношения концентраций атомов О и молекул N₂ на опорном уровне средней и верхней термосферы 120 км ($R_1 = [\text{O}]/[\text{N}_2]$), а также отношений [O₂]/[N₂] и [O₂]/[O]. Процедура оценки по указанной методике подробно описана в работе [6].

Оценки проведены с помощью уравнения регрессии полуэмпирической модели (ПЭМ) [7]:

$$\begin{aligned} N/N_{\text{av}} = & X_1 + X_2[n_1/(5n_2+n_3)]^{1.5} + X_3(n_1/n_3)^{0.5}(\cos\chi)^{0.5} + \\ & + X_4\exp[-(T_{\text{ex}}-600)/600] + X_5(E/E_0). \end{aligned}$$

Здесь N – электронная концентрация. Величина N_{av} определяет среднее значение N по всему объему использованных данных отдельно для каждой высоты. X_j – искомые коэффициенты уравнения модели, n_1 , n_2 , n_3 – соответственно концентрации частиц атомарного кислорода, молекул кислорода и азота на высоте 120 км. T_{ex} – температура экзосферы, или асимптотическая температура термосферы, χ – зенитный угол Солнца.

Второй член уравнения описывает зависимость N от атомных и молекулярных газовых частиц, третий член дает зависимость от $\cos\chi$, которая, в свою очередь, зависит от отношения (n_1/n_3) ; четвертый член описывает связь N с T_{ex} . Роль последних трех членов заключается в описании зависимости N от ионизирующего излучения Солнца. Член $X_5(E/E_0)$ показывает зависимость от относительной величины энергии потока ионизирующего излучения в диапазоне 5–105 нм по модели спектрального распределения интенсивности ультрафиолетового излучения Солнца [8]. Величина E рассчитывается по заданным значениям индекса солнечной активности $F_{10.7}$ в единицах $10^{-22} \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{Гц}^{-1}$, при этом используются ежедневные значения (F) и осредненные по 81 дню с центром в рассматриваемый день (F_{av}). E_0 – величина E при максимуме солнечной активности, когда $F=F_{\text{av}}=250$. Коэффициенты уравнения были получены при использовании модели термосферы МСИС-86 [9] (для определения n_j , T_{ex}) и экспериментальных данных по N из наблюдений методом вертикального зондирования ионосферы в 1957–1967 гг. в Регулярные мировые дни в обсерватории Москва [10].

Полученная модель многократно использовалась для сравнения расчетных и экспериментальных данных по N на разных ионосферных станциях, по которым в МЦД-Б2 имелись материалы расчетов высотных профилей, при различных уровнях солнечной активности для разных сезонов. Отметим, что полученная в общей форме зависимость N от состояния термосферы позволяет распространить ее применимость на все долготы средних широт, несмотря на то, что коэффициенты уравнения рассчитаны по измерениям в одном географическом пункте (обсерватория Москва).

Для проведения оценок относительного содержания атомарного кислорода мы использовали измерения N , полученные с помощью дигизонда в полдень на высотах 120–200 км. В табл. 4 представлены величины отношений [O]/[N₂] и [O₂]/[O] в полдень с 1 по 17 апреля 2005 г. Отношение [O₂]/[O] – результат деления отношения [O₂]/[N₂] на $R_1=[\text{O}]/[\text{N}_2]$.

Отчетливо проявляется понижение R_1 в дни по-

вышенных значений A_p – 5, 12 и 13 апреля. Значение A_p – 9, 11, 14, 16, 33, 36, 30, 19, 7, 4, 4, 9, 33, 30, 7, 7.

Таблица 4
Величины отношений [O]/[N₂] и [O₂]/[O] для апреля 2005 г.

Число	[O]/[N ₂]	[O ₂]/[O]	A_p
1	0.33	0.38	9
2	0.31	0.40	9
3	0.32	0.48	5
4	0.35	0.41	16
5	0.19	1.34	36
6	0.30	0.36	11
7	0.22	0.75	7
8	0.28	0.46	4
9	0.26	0.42	4
10	0.33	0.45	4
11	0.31	0.50	9
12	0.20	1.31	33
13	0.20	1.55	30
14	0.32	0.38	19
15	0.24	0.53	14
16	0.28	0.56	7
17	0.25	0.56	7

R_1 в эти дни понижается более чем в полтора раза в сравнении с соседними спокойными в геомагнитном отношении днями.

В возмущенные дни резко повышается величина отношения [O₂]/[O], 5 апреля в 3–3.5 раза увеличивается содержание молекулярного кислорода относительно атомарного. Примерно в такой же степени происходит рассматриваемое повышение 12 и 13 апреля.

Заключение

Рассмотренные в статье возмущения в апреле 2005 г., несмотря на весьма умеренные возмущения геомагнитного поля (когда среднесуточный индекс A_p имел величины 30–36), характеризуются выраженнымми эффектами в электронной концентрации как в слое F2, так и на высотах области F1 выше 160 км. Эти возмущения ионосферы обусловлены существенными изменениями газового состава. Согласно нашим оценкам, относительное содержание атомарного кислорода ([O]/[N₂]) понижалось в полуденные часы возмущенных дней примерно в полтора раза. В то же время резко, примерно в 3.5 раза, возрастало отношение концентраций молекул и атомов кислорода на опорном уровне термосферы 120 км. При этом последнее отношение отличается от предлагаемого моделью термосферы наиболее сильно 5 апреля, когда наша оценка в 1.4 раза превышает модельное значение. Однако 12 и 13 апреля обсуждаемое отличие лежит в пределах от 8 до 11 %. Оценки относительного содержания атомарного кислорода в возмущенные дни отличаются от модельных значений не более чем на 9 %. Иначе говоря, эта величина во время возмущений близка к той, которая дается моделью термосферы МСИС-86 [9].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Appleton E.V., Piggot W.R. The morphology of storm in the F2 layer of the ionosphere. 1. Some statistical relationships // J. Atm. Terr. Phys. 1952. V. 2. P. 236–252.
- Martin D.E. Geo-morphology of F2-region ionospheric storms // Nature. 1953. V. 171. P. 14–16.
- Danilov A.D. F2-region response to geomagnetic distur-

- bances // J. Atm. Solar-Terr. Phys. 2001. V. 63. P. 441–449.
4. Prolss G.W. On explaining the local time variation of ionospheric storm effect // Ann. Geophys. 1993. V. 11. P. 1–9.
5. Buresova D., Lastovicka J. Changes in the F1 region electron density during geomagnetic storms at low solar activity // J. Atm. Solar-Terr. Phys. 2001. V. 63. P. 537–544.
6. Щепкин Л.А., Кушнаренко Г.П., Кузнецова Г.М. Возможность оценок относительного содержания атомов и молекул кислорода по данным измерений электронной концентрации в средней ионосфере // Геомагнетизм и аэрономия. 2008. Т. 48, № 1. С. 1–5.
7. Щепкин Л.А., Кушнаренко Г.П., Кузнецова Г.М. Уравнение модели связи электронной концентрации с характеристиками термосферы с учетом потока ионизирующего излучения // Геомагнетизм и аэрономия. 2004. Т. 44, № 1. С. 119–122.
8. Tobiska W.K., Eparvier F.G. EUV97: Improvements to EUV irradiance modeling in the soft X-rays and EUV // Solar Phys. 1998. V. 147, N 1. P. 147–159.
9. Hedin A.E. MSIS-86 thermospheric model // J. Geophys. Res. 1987. V. 92, N A5. P. 4649–4662.
10. Щепкин Л.А., Кушнаренко Г.П., Фрейзон И.А., Кузнецова Г.М. Связь электронной концентрации в средней ионосфере с состоянием термосферы // Геомагнетизм и аэрономия. 1997. Т. 37, № 5. С. 106–113.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск