

**ПРИЗНАКИ АНОМАЛЬНОГО ПОВЕДЕНИЯ ИОНОСФЕРЫ В 2003–2014 гг.  
НА ВЫСОТАХ СЛОЯ F1 НАД ИРКУТСКОМ****SIGNS OF ANOMALOUS BEHAVIOR OF THE IONOSPHERE IN 2003–2014  
AT F1-LAYER HEIGHTS OVER IRKUTSK****Г.П. Кушнаренко***Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, kusch@iszf.irk.ru***О.Е. Яковлева***Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, yakovleva@iszf.irk.ru***Г.М. Кузнецова***Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, kuz@iszf.irk.ru***G.P. Kushnarenko***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, kusch@iszf.irk.ru***O.E. Yakovleva***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, yakovleva@iszf.irk.ru***G.M. Kuznetsova***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, kuz@iszf.irk.ru*

**Аннотация.** Обнаружено аномальное повышение электронной концентрации  $N_e$  в зимние месяцы над Иркутском в отдельные годы периода 2003–2014 гг. Эффект проявился при сравнении экспериментальных значений, полученных с помощью Иркутского дигизонда, с модельными расчетами на высотах слоя F1 (120–200 км). Были найдены две аномальные временные зоны. Первая включает в себя 2003–2006 гг. и прилегает к периоду минимума солнечной активности. В этой зоне 2003 г. — год максимального проявления зимнего повышения  $N_e$  по всему периоду исследований. Вторая аномальная зона — 2012, 2013, 2014 гг. — включает в себя год максимума солнечной активности. Мы исследовали возможные причины, влияющие на изменение  $N_e$  зимой на высотах слоя F1 во все рассматриваемые годы. Обнаружено, что основным фактором, вызывающим зимние аномальные повышения  $N_e$ , являются значительные геомагнитные возмущения в отмеченные временные зоны.

**Ключевые слова:** электронная концентрация, зимнее превышение  $N_e$ , геомагнитная активность.

**Abstract.** We have detected an anomalous electron density  $N_e$  increase in winter months in Irkutsk in some years of the period 2003–2014. This effect was manifested when we compared the experimental values obtained by the Irkutsk ionosonde with model calculations at F1-layer heights (120–200 km). Two anomalous time zones have been found. The first was observed in the period 2003–2006 near solar minimum. In this zone, 2003 is the year of maximum manifestation of the winter  $N_e$  increase over the entire research period. The second anomalous zone — 2012, 2013, 2014 — was detected during solar maximum. We have explored possible causes of the  $N_e$  change in winter at the F1-layer heights in all the years under study. We have found that the main factor causing the winter increase in  $N_e$  is significant geomagnetic disturbances in the above time periods.

**Keywords:** electron density, winter increase in  $N_e$ , geomagnetic activity.

**ВВЕДЕНИЕ**

Геомагнитные возмущения вызывают различные изменения в сложной системе атмосфера — ионосфера, воздействуя на электрические поля, температуру, ветер и газовый состав, и влияют на все ионосферные параметры.

В возмущенных условиях изменения газового состава термосферы распространяются от высоких широт к средним широтам и дальше к экватору и воздействуют на баланс процессов ионообразования и потерь. Конкретный эффект зависит от магнитной широты. В газовом составе возмущенной зоны отмечается существенное увеличение концентрации молекулярного азота и одновременное уменьшение концентрации атомарного кислорода [Buresova et al., 2002]. По измерениям на спутниках [Goncharenko et al., 2006] известно, что нейтральный состав зоны возмущения также характеризуется уменьшением

концентрации атомарного кислорода и существенным возрастанием концентрации молекулярного азота. Эти изменения наблюдаются не только летом в условиях солнечного минимума, но и в течение всего солнечного цикла во время возмущенных периодов. Измерения на спутнике SETA полной нейтральной плотности вблизи высоты 200 км выявляют ее увеличение более чем на 50 % в высоких широтах в течение геомагнитных штормов с существенным увеличением при движении в направлении экватора [Lastovicka, 2002].

Солнечное ионизирующее излучение проникает во все ионосферные области, и в соответствии с их газовым составом и различными структурными особенностями можно ожидать разной реакции каждой области на геомагнитные возмущения. Имеются многочисленные публикации, рассматривающие влияние геомагнитных штормов на ионосферу [Buresova, Lastovicka, 2001; Buresova et al., 2002;

Lastovicka, 2002, 2005; Кушнаренко и др., 2018]. Однако до сих пор нет ясного понимания некоторых механизмов, обуславливающих реакцию ионизации во время геомагнитных бурь, особенно в нижней части области F2 — на высотах слоя F1. Давно известно о существовании зимней аномалии, или сезонного эффекта [Уиттен, Поппов, 1977; Поляков и др., 1968; Физика верхней атмосферы, 1963], которая выражается в значительном повышении электронной концентрации  $N_e$  в зимние месяцы по сравнению с летними и связана с ионосферным слоем F2. Уиттен и Поппов [1977] так описывают это явление: «Зимняя аномалия характеризуется ростом  $N_e$  в слое F (главным образом на средних широтах) в течение декабря–января–февраля. Причина этого явления неизвестна, но есть основания полагать, что оно имеет геомагнитный характер». Существуют современные работы, например [Yasyukevich et al., 2018], посвященные проявлениям зимней аномалии в полном электронном содержании в периоды значительных геомагнитных возмущений. Статистическое исследование [Ратовский и др., 2018] показывает, что зимой во время геомагнитных бурь над Иркутском формируются наиболее сильные положительные возмущения электронного содержания в максимуме слоя F2 ( $N_mF2$ ), а летом — наиболее сильные отрицательные возмущения  $N_mF2$ . Это косвенно говорит об усилении зимней аномалии в  $N_mF2$  при увеличении геомагнитной активности.

Нами было выявлено аномальное повышение  $N_e$  в зимние месяцы в отдельные годы периода 2003–2014 гг. при сравнении массива электронной концентрации, полученного по измерениям с помощью Иркутского дигизонда, с модельными расчетами на высотах 120–200 км. Этот диапазон высот — часть нижней ионосферы (а конкретно области F), где при некоторых условиях образуется F1-слой. Далее в тексте термин «высоты F1-слоя» будет использоваться вместо термина «F1-слой», поскольку F1-слой не существует как отдельный слой зимой в невозмущенных условиях в средних широтах. Однако, согласно наблюдениям [Buresova et al., 2002; Полах и др., 2019], во время достаточно сильных геомагнитных штормов F1-слой развивается даже зимой.

Мы решили исследовать временные периоды, когда проявляются эти аномальные повышения  $N_e$  на высотах слоя F1 в указанные годы, и обозначить вызывающие их причины. Целью этого исследования является расширение знаний о реакции ионосферной области F1 на геомагнитные возмущения.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для расчетов была использована полуэмпирическая модель (ПЭМ), описывающая связь  $N_e$  с характеристиками термосферы [Щепкин и др., 1997]. На рис. 1 для ст. Иркутск показаны годовые изменения в 2003 г. экспериментальных и модельных значений электронной концентрации в 12 LT на высоте 200 км, характеризующейся наиболее выраженными суточными и сезонными вариациями  $N_e$  в связи с изменением солнечной и геомагнитной активности.

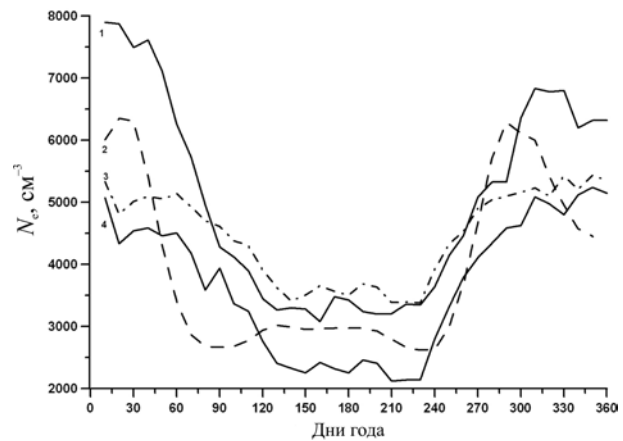


Рис. 1. Сравнение экспериментальных и модельных значений  $N_e$  (2003 г., 200 км, 12 LT): 1 — дигизонд; 2 — модель IRI [Bilitza, 2017]; 3, 4 — модель ПЭМ [Щепкин и др., 1997] с разными коэффициентами

Экспериментальные и модельные значения  $N_e$  приведены для дней года 10, 20, ..., 360. Видно, что измеренные в зимние месяцы значения  $N_e$  существенно, в 1.5–2 раза, превышают модельные значения. Поскольку модельные значения  $N_e$  прошли детальную проверку путем сравнения с экспериментальными данными, полученными на ряде станций средних широт [Щепкин и др., 2005, 2007, 2008, 2009] для разных уровней солнечной активности и разных сезонов, не приходится сомневаться в корректности модельных расчетов.

В нашей работе проводится исследование возможных причин аномального повышения  $N_e$  в зимних условиях на высотах слоя F1 в средних широтах (Иркутск) в годы с разной солнечной активностью периода 2003–2014 гг.

## ИЗМЕНЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ АТОМАРНОГО КИСЛОРОДА С ВЫСОТОЙ

Зимнее аномальное превышение  $N_e$  над ожидаемыми значениями уменьшается при снижении высоты с 200 до 120 км. В качестве примера приведем в табл. 1 экспериментальные данные  $N_{ex}$  (дигизонд) для нескольких зимних дней января 2003 г., 12 LT, в сравнении с рассчитанными по ПЭМ [Щепкин и др., 1997] значениями электронной концентрации  $N_{calc}$ .

Характер высотного изменения электронной концентрации свидетельствует о том, что одной из причин вариаций  $N_e$  является, по-видимому, аномальное повышение содержания атомарного кислорода. Относительное содержание [O] имеет важное аэрономическое значение, определяющее параметры ионосферы в конкретных условиях [Щепкин, Климов, 1980]. Действительно, относительное содержание атомарного кислорода изменяется с высотой именно таким образом: оно очень мало на высотах 120–150 км (10–30 % от концентраций молекул кислорода [O<sub>2</sub>] и азота [N<sub>2</sub>]), но быстро растет с высотой и в интервале 180–250 км сравнивается с концентрацией [N<sub>2</sub>] с максимальными значениями в районе 200 км. Характерно, что высотное изменение концентрации [O] сильно зависит от гелиогеофизических условий.

Таблица 1

Значения  $N_{ex}$  и  $N_{clc}$  ( $\times 10^2$ ) для отдельных дней января 2003 г., 12 LT, Иркутск

Высота, км	14.01.2003		15.01.2003		16.01.2003		17.01.2003	
	$N_{ex}$	$N_{clc}$	$N_{ex}$	$N_{clc}$	$N_{ex}$	$N_{clc}$	$N_{ex}$	$N_{clc}$
120	7.70	8.60	7.80	8.60	7.80	8.60	7.90	8.70
130	8.60	10.2	8.70	10.3	8.70	10.4	8.80	10.4
140	12.7	11.9	12.7	12.0	11.0	12.1	11.5	12.2
150	18.3	13.9	17.5	14.1	13.6	14.2	14.7	14.3
160	26.5	16.7	24.2	16.8	17.1	17.1	18.8	17.2
170	38.0	20.6	34.9	20.8	22.1	21.1	24.7	21.2
180	52.3	25.9	51.3	26.2	31.0	26.5	34.2	26.6
190	68.0	33.7	72.1	34.0	49.4	34.4	50.7	34.4
200	84.1	43.2	94.5	43.5	75.0	44.0	74.2	43.9

### МЕТОД И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Чтобы проследить, как изменяется полуденная концентрация [O] на высоте 200 км в годы с разной солнечной активностью, мы с помощью ПЭМ оценили ежедневные значения  $k_1$  для периода 2003–2014 гг.;  $k_1$  является отношением реального значения концентрации атомарного кислорода, нужного для согласования модельных значений  $N_e$  с экспериментальными, к значению [O] по рабочей модели термосферы. Для определения  $k_1$  используется уравнение ПЭМ [Щепкин и др., 2009]:

$$N_e / N_{av} = X_1 + X_2 \left[ n_1 / (5n_2 + n_3) \right]^{1.5} + X_3 (n_1 / n_3)^{0.5} (\cos \chi)^{0.5} + X_4 \exp \left[ -(T_{ex} - 600) / 600 \right] + X_5 (E / E_0). \tag{1}$$

Здесь  $N_{av}$  — среднее значение  $N_e$  по всему объему использованных данных отдельно для каждой высоты;  $X_j$  — коэффициенты уравнения модели;  $n_1, n_2, n_3$  — концентрации атомарного кислорода, молекулярных кислорода и азота в модели термосферы соответственно;  $T_{ex}$  — температура экзосферы;  $\chi$  — зенитный угол Солнца;  $E_0$  — энергия потока ионизирующего излучения в максимуме солнечной активности [Tobiska, Eparvier, 1998]. В рабочих расчетах по ПЭМ была использована модель термосферы NRLMSISE-00 [Picone et al., 2002]. Измерения  $N_e$ , полученные с помощью Иркутского дигизонда, брались для дневных часов на высотах 120, 130, ..., 190, 200 км в период 2003–2014 гг. Значения индексов  $F10.7$  и  $A_p$  взяты из базы данных WDC в Киото [<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>]. В ПЭМ использовались коэффициенты, соответствующие определенным годам, для которых рассчитывались величины  $k_1$ . По этим данным можно оценить искомые величины  $k_1$ , приведенные в табл. 2. Чтобы сделать таблицу более компактной, значения  $k_1$  представлены для двух зимних месяцев (январь, февраль) через пять дней, в остальной период через двадцать дней. Полученные оценки  $k_1$  помогут понять, могут ли аномальные повышения  $N_{ex}$ , если они существуют в другие годы рассматриваемого периода, в какой-то степени объясняться поведением относительного содержания [O].

Проанализируем приведенные в табл. 2 изменения относительной концентрации [O] в годы с разной солнечной активностью.

### $k_1$ в 2004–2006 гг.

В зимние месяцы этих лет существует превышение реальных концентраций [O] над модельными: в январе–феврале 2004 г.  $k_1$  изменялось от 1.1 до 1.8. В 2005 г. и в 2006 г.  $k_1$  принимает значения от 1.1 до 1.5 в основном в зимние месяцы. В остальное время года значения  $k_1$  изменялись около 1, т. е. в согласии с модельным описанием.

### $k_1$ в 2003 г. и в годы минимума

На рис. 2 показаны два массива данных  $k_1$ : для аномального геомагнитно-возмущенного 2003 г. [Панасюк и др., 2004] и геомагнитно-спокойного 2009 г. Весь зимний период 2003 г. характеризуется значениями  $k_1$ , превышающими 1, — от 1.3 до 1.8. Они намного больше величин  $k_1$  в 2009 г. Это превышение  $k_1$  над 1, хотя и в меньшей степени, характерно и для конца 2003 г.

Подразумевается, что в указанные периоды реальная концентрация атомарного кислорода превышает модельную в 1.5–2 раза, т. е. в 2003 г. нужно увеличить концентрацию [O] в модели термосферы, чтобы согласовать модельные  $N_e$  с наблюдаемыми.

Годы длительного минимума (2007–2009 гг.) характеризуются довольно спокойными геомагнитными условиями. Этим условиям соответствуют и величины  $k_1$ : в два зимних месяца 2007 г. их значения 0.7–1.0. В другие годы минимума (2008, 2009) значения  $k_1$  также близки к 1.

К геомагнитно-спокойным можно отнести и 2010 и 2011 гг., когда значения  $k_1$  в зимний период находятся около 1. Таким образом, модель хорошо описы-

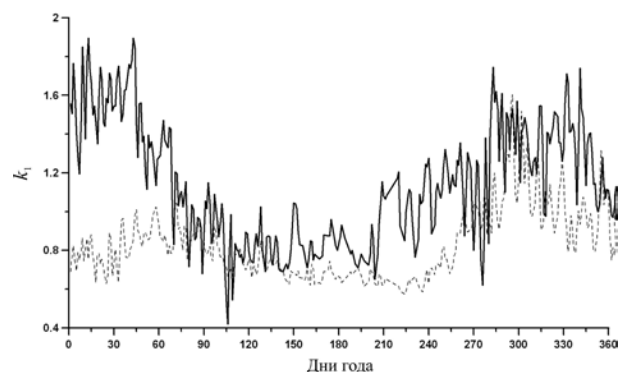


Рис. 2. Значения  $k_1$  в 2003 г. (сплошная линия) и в 2009 г. (штрихи), 200 км, 12 LT

Таблица 2

Значения  $k_1$ , высота 200 км, 12 LT, Иркутск

День года	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
1	1.79	1.25	1.08	1.45	0.9	0.82	0.7	0.76	1.06	1.29	1.07	0.96
5	1.41	1.43	1.4	1.28	1.1	0.95	0.69	0.88	0.98	1.08	1.27	0.96
10	1.98	1.3	0.94	1.3	1.03	0.83	0.76	0.81	1.19	1.44	1.3	1.08
15	1.83	1.11	1.52	1.04	1.06	1	1.05	0.75	0.86	1.39	1.13	1.2
20	1.36	1.42	1.28	1.01	0.71	0.74	0.9	0.99	0.89	1.2	1.44	1.33
25	1.83	0.95	1.07	1.19	0.68	0.67	0.67	0.94	0.77	1.22	1.47	1.14
30	1.21	1.07	1.38	0.94	1	0.68	0.7	1.06	1	1.36	1.21	1.27
35	1.56	1.01	1.06	1.44	0.87	0.65	0.65	0.91	0.89	1.36	1.21	1.27
40	1.61	1.16	1.01	1.09	0.94	1.06	0.67	0.72	0.87	1.09	1.22	1.41
45	1.75	1.68	1.35	0.97	0.94	0.83	0.72	0.94	0.97	1.16	1.36	1.11
50	1.75	1.45	1.52	1.38	1.03	1.11	1.08	1	0.98	1.19	1.15	1.16
55	1.43	1.41	1.03	1.28	0.82	0.82	0.79	0.96	0.83	1.11	0.87	1.36
60	1.45	1.19	1.02	1.09	1.08	0.69	0.85	1.09	0.88	1.45	1.14	1.04
70	1.35	1.13	0.85	0.88	0.97	0.74	0.8	1.1	0.83	1.19	1.18	1.24
90	0.92	1.24	1.23	0.83	0.74	1.15	0.86	0.98	0.94	1.23	1.23	1.28
110	0.8	1.06	0.99	0.68	0.9	0.7	0.72	0.83	0.81	1.1	1.02	1.08
130	0.76	1.01	0.75	0.93	0.73	0.56	0.85	0.83	0.82	0.86	0.69	0.86
150	0.68	0.87	0.77	0.82	0.76	0.59	0.61	0.64	0.73	0.79	0.74	0.97
170	0.82	0.99	0.62	0.72	0.81	0.65	0.69	0.67	0.69	0.87	0.79	0.79
190	0.95	0.90	0.82	0.77	0.74	0.56	0.69	0.62	0.81	0.71	0.94	0.74
210	0.80	0.85	0.76	1.08	0.69	0.67	0.61	0.61	0.76	0.72	0.76	0.80
230	0.65	0.87	0.71	0.81	0.71	0.6	0.61	0.64	0.80	0.84	0.95	0.80
250	1.05	0.69	0.69	0.8	0.64	0.67	0.91	0.97	0.90	0.91	0.79	0.62
270	0.80	0.85	0.62	0.93	0.73	0.87	0.92	0.98	0.82	0.83	0.74	0.86
290	1.26	1.09	1.09	0.96	0.91	1.0	1.09	0.86	1.25	0.97	1.02	0.93
310	1.88	1.03	1.28	1.17	0.84	1.07	1.05	1.12	1.02	1.08	1.19	1.08
330	1.52	1.17	1.07	1.06	1.25	0.85	1.42	0.91	1.0	1.41	1.15	0.86
350	1.38	1.30	0.91	0.98	0.86	0.92	0.90	1.34	1.09	1.06	1.25	1.22

вает изменение концентрации атомарного кислорода в спокойных условиях.

**$k_1$  в 2012–2014 гг.**

Относительное содержание [O] в зимние месяцы больше 1 и для всех лет изменяется примерно одинаково — от 1.1 до 1.5.

**ИЗМЕНЕНИЕ  $r=N_{ex}/N_{clc}$  В ГОДЫ С РАЗНОЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТЬЮ**

С помощью ПЭМ [Щепкин и др., 2009] были рассчитаны полуденные значения  $N_{clc}$  в зимние месяцы (в дни года  $D=1, 2, \dots, 60$ ) периода 2003–2014 гг. на высоте 200 км. В табл. 3 представлены отношения  $r$  экспериментальных значений электронной концентрации (дигизонд) к рассчитанным по модели:  $r=N_{ex}/N_{clc}$ . Чтобы уменьшить таблицу, значения  $r$  приведены для десяти дней января, а затем для каждого пятого зимнего дня. Рассмотрим изменения  $r$  в исследуемый период, чтобы выявить годы, когда присутствуют зимние повышения  $N_{ex}$ .

**$r$  в 2003–2006 гг.**

С 2003 по 2006 г. все значения  $r$  превышают 1, но самые большие  $r$  наблюдаются в 2003 г. — от 1.3 до 2.3. В январе и феврале 2003 г. присутствуют геомагнитные возмущения, характеризующиеся

среднедневными  $A_p$ -индексами 27, 32, 39, 48, 56, 67 [http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp]. Значительные геомагнитные события со среднедневными  $A_p$ -индексами 37, 48, 58, 66, 84 наблюдались и в зимние месяцы 2004 и 2005 гг. Отношение  $N_{ex}/N_{clc}$  в эти годы изменялось от 1.0 до 1.8, что также подтверждает зависимость  $r$  от интенсивности геомагнитных возмущений.

**$r$  в 2003 и 2007 гг.**

В последнем цикле солнечной активности (с максимумом в 2014 г.) самый геомагнитно-возмущенный год — 2003 [Панасюк и др., 2004], а самый геомагнитно-спокойный период — годы минимума (2007–2009 гг.). На рис. 3 для этих лет показаны полуденные изменения  $r$  на высоте 200 км зимой. Значения  $N_{ex}$  аномально высоки в январе–феврале 2003 г.:  $r$  изменяется от 1.3 до 2.3, в то же время в 2007 г. величины  $r$  весь зимний период намного ниже.

Большие значения  $N_{ex}$  в зимние месяцы 2003 г. можно объяснить влиянием изменения интенсивности УФ-радиации: в 2003 г. в январе и феврале среднемесячные величины индекса солнечной активности  $F10.7$  составляли 139 и 121 при среднем годовом значении 123. В 2007 г. в январе и феврале аналогичные значения  $F10.7$  — 83 и 78, среднегодовой индекс — 74, т. е. величины  $F10.7$  гораздо ниже, чем в 2003 г.

Таблица 3

Отношение  $r=N_{ex}/N_{cle}$  (январь, февраль), 200 км, 12 LT, Иркутск

День года	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
1	2.05	1.54	1.10	1.53	0.91	0.81	0.68	0.71	1.08	1.39	1.09	0.97
2	1.40	1.85	1.76	1.85	1.26	0.74	0.67	0.73	1.05	1.33	1.16	1.14
3	1.84	1.67	1.27	1.80	1.42	0.84	0.86	0.61	0.84	1.75	1.20	1.50
4	2.01	1.28	1.55	1.35	1.16	0.76	0.78	0.97	1.06	1.44	1.30	1.02
5	1.45	1.95	1.50	1.32	1.10	0.99	0.68	0.78	0.96	1.10	1.33	0.93
6	1.40	1.66	1.00	1.36	1.04	0.91	0.69	0.86	0.93	1.39	1.49	1.17
7	1.20	1.60	1.34	1.42	1.17	1.09	0.86	0.73	1.53	1.48	1.75	1.00
8	1.20	1.50	0.70	1.09	1.04	0.82	0.61	0.81	1.35	1.64	1.45	1.47
9	1.76	1.74	1.14	1.20	0.96	1.01	0.98	0.68	1.18	1.21	1.58	1.03
10	2.05	1.80	0.94	1.19	1.03	0.81	0.75	0.98	1.26	1.58	1.30	1.09
15	1.95	1.62	1.53	0.83	1.28	0.99	1.06	0.74	0.83	1.53	1.41	1.27
20	1.40	1.45	1.22	1.34	0.94	0.72	0.88	0.90	0.87	1.25	1.52	1.45
25	1.62	1.68	1.37	0.92	0.70	0.86	0.63	0.47	0.94	1.28	1.31	1.19
30	1.26	1.36	1.47	1.11	0.98	0.97	0.69	0.83	0.84	1.48	1.41	1.33
35	1.62	1.47	1.08	1.67	0.86	0.85	0.92	0.76	1.10	1.32	1.41	1.10
40	1.67	1.32	1.00	1.01	0.92	0.79	0.73	0.96	0.90	1.06	1.27	1.33
45	1.88	1.36	1.36	0.95	0.94	1.16	1.13	1.21	0.58	1.33	1.49	1.32
50	1.87	1.28	1.57	1.16	1.02	1.16	0.84	0.95	0.99	1.36	1.19	1.58
55	1.51	1.12	1.24	1.34	0.98	0.88	0.89	1.12	1.02	1.18	0.84	1.27
60	1.46	1.12	1.05	1.11	1.21	1.16	0.81	1.25	0.88	1.11	1.22	1.26

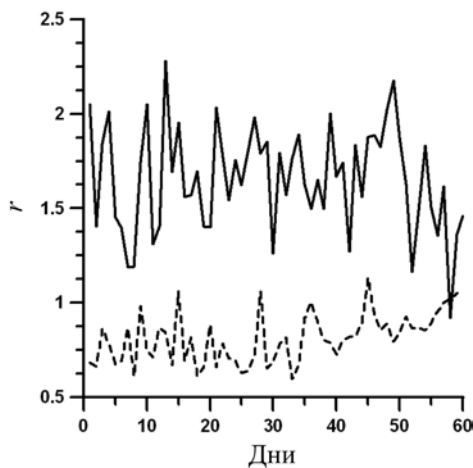


Рис. 3. Значения  $r=N_{ex}/N_{cle}$  в 2003 г. (сплошная линия) и 2007 г. (штрихи), 200 км, 12 LT. На оси X — номера зимних дней в году

Существуют и другие факторы, воздействующие на повышения  $N_e$ , такие как повышенные значения [O] в 2003 г., а также наличие значительных геомагнитных возмущений в эти месяцы в сравнении с 2007 г. Предстоит выяснить, какая причина выйдет на первое место по значимости, при анализе повышенных величин электронной концентрации в другие исследуемые годы.

**r в 2010 и 2011 гг.**

В основном значения  $r$  находятся около 1, лишь в первые четырнадцать дней января в 2011 г.  $r$  изменяется от 1.0 до 1.5, а в 2010 г.  $r$  больше 1 в последние две недели февраля. На эти периоды приходятся геомагнитные возмущения: в первом случае со среднедневным индексом  $A_p=32$ , во втором случае с  $A_p=32$  и 48.

**r в 2012–2014 гг.**

Значения  $r$  во все эти годы зимой выше 1 и изменяются от 1.0 до 1.6, в 2012 г. имеются отдельные выбросы до 1.9 (см. рис. 4). Можно уверенно говорить о зимнем аномальном повышении  $N_{ex}$  в этот период на высотах слоя F1.

В январе 2012 г. значения  $r$  выше, чем в 2014 г., на который пришелся максимум солнечной активности, и изменяются от 1.1 до 1.9. Рассмотрев изменения  $k_1$  (табл. 2) для этих лет, приходим к выводу, что относительное содержание [O] в зимние месяцы изменялось в эти годы примерно одинаково — от 1.1 до 1.5, т. е. изменение [O] в данный период не является решающим при объяснении повышений  $r$  в 2012 г.

Что касается влияния изменения солнечной активности, то в 2012 г. среднегодовое значение  $F10.7$  — 120, а среднемесячные значения в январе и феврале — 129 и 104. В 2014 г. среднегодовой  $F10.7$  — 46, средне-

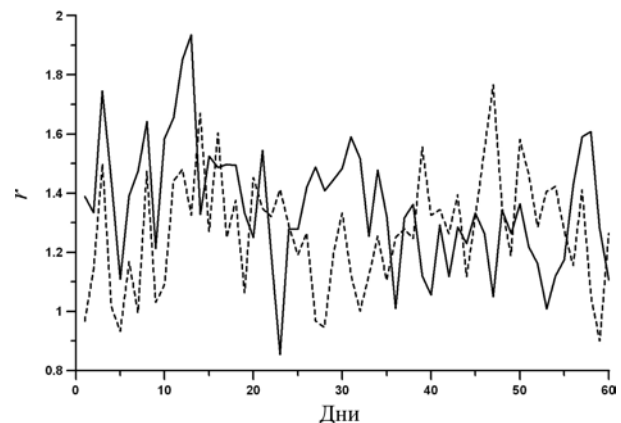


Рис. 4. Значения  $r=N_{ex}/N_{cle}$  в 2012 г. (сплошная линия) и в 2014 г. (штрихи), 200 км, 12 LT. На оси X — номера зимних дней в году



месячные для января и февраля — 155 и 166 соответственно, т.е. значительно выше, чем в 2012 г. При этом  $r$  в 2012 г. в зимние месяцы выше, чем в 2014 г. — году максимума солнечной активности, т.е. большая величина индекса  $F10.7$  не является основным фактором значительного повышения  $N_e$  в 2012 г. При рассмотрении геомагнитной обстановки этих лет выясняется, что наиболее возмущенные условия приходится именно на январь 2012 г.: их характеризуют среднедневные индексы  $A_p=39, 56, 67, 80, 154$ . В последующие годы (2013, 2014) геомагнитная активность снижается. Значит, именно геомагнитная обстановка является основной причиной больших величин  $N_e$  в январе 2012 г. по сравнению с январем 2014 г. — года максимума. Картина меняется в феврале (рис. 4), поскольку геомагнитные возмущения в 2014 г. (среднедневные индексы  $A_p=27, 39, 48, 56, 80, 90$ ) более интенсивны по сравнению с 2012 г. ( $A_p=32, 39, 48, 56$ ). Как следствие, величины  $r$  в феврале 2014 г. значительно выше, чем в 2012 г. Таким образом, на первый план при объяснении зимних повышений  $N_e$  на высотах слоя F1 выдвигается такой фактор, как интенсивность геомагнитных возмущений.

Рассмотрение первого периода зимнего повышения  $N_e$  (2003–2006 гг.) подтверждает вывод, что и в этот отрезок времени значительные геомагнитные возмущения — основной фактор, вызывающий самые большие повышения  $N_e$  и зимой 2003 г., и по всему рассматриваемому периоду. Отметим, что на 2003 г. приходится экстремальные геомагнитные события [Панасюк и др., 2004].

Таким образом, выявлены две временные зоны зимнего повышения  $N_{ex}$  на высотах слоя F1: первая (2003–2006 гг.) прилагает к минимуму солнечной активности, во вторую зону (2012–2014 гг.) входит год максимума солнечной активности. Во второй временной зоне геомагнитные возмущения имеют меньшую интенсивность, чем в первой. Как результат, величины  $r$  во второй временной зоне ниже.

Мы рассматриваем обнаруженные повышения электронной концентрации в найденных временных зонах исследуемого периода как реакцию нижней части области F (на высотах слоя F1) на проявление зимней аномалии в верхней части области F во время значительных геомагнитных возмущений.

На рис. 5 показаны кривые  $r$  (зимние дни), соответствующие двум экстремально геомагнитно-возмущенным годам — 2003 и 2014 и геомагнитно-спокойному году минимума 2007. Аномальные повышения  $N_e$  проявляют себя в 2003 г. самыми высокими значениями  $r$  по всему исследуемому периоду.

## ВЫВОДЫ

1. На средних широтах (ст. Иркутск) в период 2003–2014 гг. обнаружены две временные зоны зимнего повышения электронной концентрации на высотах слоя F1: первая (2003–2006 гг.) — вблизи минимума солнечной активности, вторая (2012–2014 гг.) включает в себя год максимума. Эти зимние повышения  $N_e$  можно рассматривать как отклик нижней

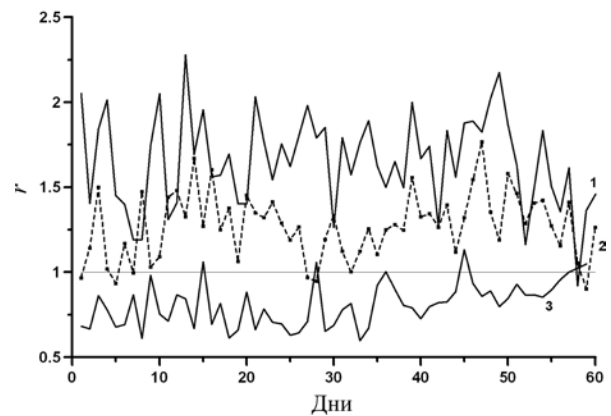


Рис. 5. Значения  $r=N_{ex}/N_{cl}$  в 2003 г. (1), в 2014 г. (2) и в 2007 г. (3), 200 км, 12 LT. На оси X — номера зимних дней в году

части области F (высоты слоя F1) на проявление зимней аномалии в верхней части области во время значительных геомагнитных возмущений.

2. Анализ возможных причин, влияющих на аномальное зимнее повышение  $N_e$  во все годы исследуемого периода 2003–2014 гг., показывает, что основной фактор, вызывающий данное явление на высотах слоя F1, — наличие значительных геомагнитных возмущений в зимние периоды в отмеченные выше временные зоны.

3. В спокойных геомагнитных условиях рабочие модели достаточно верно описывают аэрономическую обстановку на высотах ионосферного слоя F1.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (проект «Изучение состояния и динамики атмосферы Земли на различных временных масштабах под влиянием геофизических, космических и антропогенных воздействий»). Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» [<http://ckp-rf.ru/ckp/3056>].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Кушнаренко Г.П., Яковлева О.Е., Кузнецова Г.М. Эффекты геомагнитных бурь в слое F1 в разные периоды солнечной активности (ст. Иркутск). *Геомагнетизм и аэрономия*. 2018. Т. 58, № 2. С. 211–216. DOI: [10.7868/S0016794018020062](https://doi.org/10.7868/S0016794018020062).
- Панасюк М.И., Кузнецов С.Н., Лазутин Л.Л., и др. Магнитные бури в октябре 2003 г. Коллаборация «Солнечные экстремальные события 2003 года» (СЭС–2003). *Космические исследования*. 2004. Т. 42, № 5. С. 509–554.
- Полех Н.М., Черниговская М.А., Яковлева О.Е. К вопросу о формировании слоя F1 во время внезапных стратосферных потеплений. *Солнечно-земная физика*. 2019. Т. 5, № 3. С. 140–152. DOI: [10.12737/szf-53201914](https://doi.org/10.12737/szf-53201914).
- Поляков В.М., Щепкин Л.А., Казимировский Э.С., Кокоуров В.Д. *Ионосферные процессы*. Новосибирск: Наука, 1968. 536 с.
- Ратовский К.Г., Клименко М.В., Клименко В.В. и др. Эффекты последствий геомагнитных бурь: статистический анализ и теоретическое объяснение. *Солнечно-земная физика*. 2018. Т. 4, № 4. С. 32–42. DOI: [10.12737/szf-44201804](https://doi.org/10.12737/szf-44201804).
- Уиттен Р., Поппов И. Основы аэрономии. Ленинград: Гидрометеиздат, 1977. 408 с.
- Физика верхней атмосферы* / Под ред. Дж.А. Ратклифа. М.: Физматгиз, 1963. 504 с.
- Щепкин Л.А., Климов Н.Н. *Термосфера Земли*. М.: Наука, 1980. 220 с.

Щепкин Л.А., Кушнаренко Г.П., Фрейзон И.А., Кузнецова Г.М. Связь электронной концентрации в средней ионосфере с состоянием термосферы. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 1997. Т. 37, № 5. С. 106–113.

Щепкин Л.А., Кушнаренко Г.П., Кузнецова Г.М. Годовые вариации электронной концентрации в области F1 ионосферы. *Солнечно-земная физика*. 2005. Вып. 7. С. 62–65.

Щепкин Л.А., Кузнецова Г.М., Кушнаренко Г.П., Ратовский К.Г. Интерпретация измерений электронной концентрации с помощью полуэмпирической модели. *Солнечно-земная физика*. 2007. Вып. 10. С. 92–94.

Щепкин Л.А., Кузнецова Г.М., Кушнаренко Г.П., Ратовский К.Г. Аппроксимация данных по измерениям электронной концентрации в средней ионосфере при низкой солнечной активности. *Солнечно-земная физика*. 2008. Вып. 11. С. 66–69.

Щепкин Л.А., Кузнецова Г.М., Кушнаренко Г.П. Модельное описание электронной концентрации в средней ионосфере. *Солнечно-земная физика*. 2009. Вып. 13. С. 14–18.

Bilitza D., Altadill D., Truhlik V., et al. International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions. *Space Weather*. 2017. Vol. 15. P. 418–429. DOI: [10.1002/2016SW001593](https://doi.org/10.1002/2016SW001593).

Buresova D., Lastovicka J. Changes in the F1 region electron density during geomagnetic storms at low solar activity. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2001. Vol. 63. P. 537–544. DOI: [10.1016/S1364-6826\(00\)00167-X](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(00)00167-X).

Buresova D., Lastovicka J., Altadill D., Miro G. Daytime electron density at the F1-region in Europe during geomagnetic storms. *Ann. Geophys.* 2002. Vol. 20. P. 1007–1021. DOI: [10.5194/angeo-20-1007-2002](https://doi.org/10.5194/angeo-20-1007-2002).

Goncharenko L., Salah J., Crowley G., et al. Large variations in the thermosphere and ionosphere during minor geomagnetic disturbances in April 2002 and their association with IMF  $B_y$ . *J. Geophys. Res.* 2006. Vol. 111, A03303. DOI: [10.1029/2004JA010683](https://doi.org/10.1029/2004JA010683).

Lastovicka J. Monitoring and forecasting of ionospheric space weather effects of geomagnetic storms. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2002. Vol. 64. P. 697–705. DOI: [10.1016/S1364-6826\(02\)00031-7](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(02)00031-7).

Lastovicka J. On the role of solar and geomagnetic activity in long-term trends in the atmosphere–ionosphere system. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2005. Vol. 67. P. 83–92. DOI: [10.1016/j.jastp.2004.07.019](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2004.07.019).

Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C. (GTD7-2000) NRLMSISE-00 Empirical model of the atmosphere: statistical comparisons and scientific issues. *J. Geophys. Res.* 2002. Vol. 107, no. A12. P. 1469. DOI: [10.1029/2002JA009430](https://doi.org/10.1029/2002JA009430).

Tobiska W.K., Eparvier F.G. EUV97: Improvements to EUV irradiance modeling in the soft X-rays and EUV. *Solar Phys.* 1998. Vol. 147, no. 1. P. 147–159. DOI: [10.1023/A:1004931416167](https://doi.org/10.1023/A:1004931416167).

Yasyukevich Y., Yasyukevich A., Rатовский К., et al. Winter anomaly in  $N_mF2$  and TEC: when and where it can occur. *J. Space Weather Space Clim.* 2018. Vol. 8, no. A45. DOI: [10.1051/swsc/2018036](https://doi.org/10.1051/swsc/2018036).

URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056> (дата обращения 31 марта 2021 г.).

URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp> (дата обращения 31 марта 2021 г.).

Как цитировать эту статью:

Кушнаренко Г.П., Яковлева О.Е., Кузнецова Г.М. Признаки аномального поведения ионосферы в 2003–2014 гг. на высотах слоя F1 над Иркутском. *Солнечно-земная физика*. 2021. Т. 7, № 2. С. 81–87. DOI: [10.12737/szf-72202108](https://doi.org/10.12737/szf-72202108).