


МНОГОЛЕТНИЙ ТРЕНД РЕАКЦИИ Е-СЛОЯ ИОНОСФЕРЫ НА СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ

LONG-TERM TREND OF THE IONOSPHERIC E-LAYER RESPONSE TO SOLAR FLARES

Г.В. Гивишвили 

*Институт земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
Москва, Троицк, Россия, givi@izmiran.ru*

Л.Н. Лещенко 

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распро-
странения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
Москва, Троицк, Россия, ln_lesh@mail.ru*

G.V. Givishvili

*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere
and Radiowave Propagation RAS,
Moscow, Troitsk, Russia, givi@izmiran.ru*

L.N. Leshchenko

*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and
Radiowave Propagation RAS,
Moscow, Troitsk, Russia, ln_lesh@mail.ru*

Аннотация. По данным наземного вертикального зондирования (ВЗ) ионосферы на ст. Москва и на пяти японских станциях с 1969 по 2015 г. проведено исследование многолетнего отклика Е-слоя на солнечные рентгеновские вспышки. Анализ проводился на основе разработанного ранее метода оценки соотношения скоростей ионизации рентгеновским q_x и ультрафиолетовым q_u излучением во время вспышек. Подтверждено существование долговременного (по меньшей мере, охватывающего 45-летний период наблюдений) возрастания доли рентгеновского излучения в суммарной скорости ионизации Е-слоя ионосферы, характеризующейся отношением q_x/q , где $q=q_x+q_u$. Показано, что отношение q_x/q возрастало в течение всего анализируемого периода со скоростью, не зависящей от цикла солнечной активности. Не выявлено также зависимости скорости тренда q_x/q от сезона, широты (в диапазоне 26° – 56° N) и долготы (37° – 128° E).

Ключевые слова: слой Е ионосферы, вертикальное зондирование, солнечные вспышки, многолетний тренд.

Abstract. Using data from ground-based vertical sounding of the ionosphere (VS) at the station Moscow and five Japanese stations for the period from 1969 to 2015, we have examined the long-term response of the E layer to solar X-ray flares. The analysis relies on the previously developed method for estimating the ratio between rates of ionization by X-rays q_x and ultraviolet radiation q_u during flares. We confirmed the existence of a long-term (at least covering the 45-year observation period) increase in the proportion of X-rays in the total ionization rate of the ionospheric E layer, characterized by the ratio q_x/q , where $q=q_x+q_u$. The q_x/q ratio is shown to increase throughout the period of interest at a rate independent of the solar activity cycle. There is also no dependence of the q_x/q trend rate on the season, latitude (26° – 56° N), and longitude (37° – 28° E).

Keywords: ionospheric E layer, vertical sounding, solar flares, long-term trend.

ВВЕДЕНИЕ

В работе [Иванов-Холодный и др., 1976] был предложен метод оценки соотношения вкладов рентгеновского и ультрафиолетового излучений Солнца в ионизацию Е-слоя ионосферы по ее реакции на солнечные рентгеновские вспышки. Попытка применить данный метод к оценке сезонной изменчивости соотношения долей скорости ионизации рентгеновским q_x и ультрафиолетовым q_u излучениями Солнца в ионизацию Е-слоя привела авторов работы [Иванов-Холодный и др., 1977] к выводу, что это соотношение меняется в течение года. Это обстоятельство дало основание авторам сделать вывод о том, что контроль за соотношением q_x/q_u позволит оценивать сезонную изменчивость основных газовых компонент на высотах области Е. Поэтому развитый метод был принят на вооружение в работе [Гивишвили и др., 2005] для оценки теперь уже долговременных вариаций вспышечных явлений, на основа-

нии которых можно было бы судить о многолетних изменениях газового состава нижней термосферы.

Результаты анализа 68 вспышечных явлений, зарегистрированных на станции вертикального зондирования (ВЗ) Москвы с 1969 по 1990 гг., свидетельствовали о многолетнем росте относительного вклада рентгеновского излучения в суммарную ионизацию нижней термосферы в области высот 90–130 км. Поэтому естественным образом возник вопрос о природе выявленного эффекта: имеет ли он локальный или глобальный характер и, кроме того, существует ли какая-либо зависимость отношения q_x/q_u от широты места наблюдения и времени года. Цель настоящей работы состоит в попытке дать ответ на эти вопросы.

1. ТЕХНОЛОГИЯ ОЦЕНКИ РЕАКЦИИ f_oE НА ВСПЫШКУ

Вклад рентгеновского излучения в общую ионизацию области во время вспышки оценивается выражением [Иванов-Холодный и др., 1976]

$$q_x / q = \left\{ \left[f_0 E^B / f_0 E \right]^4 - 1 \right\} / \left\{ \left[J_{1-8}^B / J_{1-8} \right]^P - 1 \right\}, \quad (1)$$

где $q = q_x + q_u$; $q_x/q = (q_x/q_u)(1 - q_x/q)$; J_{1-8}^B — интенсивность рентгеновского излучения в диапазоне 1–8 Å во время вспышки; J_{1-8} — фоновая интенсивность того же излучения; $P = 0.25 \pm 0.10$; $f_0 E$ — критическая частота E-слоя. Поскольку $q_x/q_u \propto q_x/q$, соотношение скоростей ионизации рентгеновским и ультрафиолетовым излучением в дальнейшем будет отображаться в виде либо q_x/q_u , либо q_x/q .

Предположение о возможности оценки каких-либо вариаций газового состава нижней термосферы по данным регистрации вспышечных явлений основывается на том факте, что солнечное излучение в линиях 977 и 1026 Å воздействует исключительно на молекулярный кислород. Поэтому скорость ионизации q_u , обусловленная этим источником, так или иначе зависит от его концентрации, т. е. $q_u \propto [O_2]$. А поскольку рентгеновское излучение взаимодействует со всеми атмосферными составляющими, $q_x \propto \{[N_2] + [O_2] + [O]\}$. Отсюда следует, что отношение q_x/q_u (равнозначное отношению q_x/q) эквивалентно параметру $\eta = \{[N_2] + [O_2] + [O]\} / [O_2]$. Для тех или иных гелиогеофизических условий η находится из эмпирической модели атмосферы, в частности, из модели MSIS [Hedin, 1991]. Таким образом, получаем

$$q_x / q_u \propto \eta. \quad (2)$$

2. МАССИВ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Для определения широтно-долготных особенностей проявления эффекта многолетних вариаций отклика E-слоя на солнечные вспышки данные ВЗ ст. Москва, полученные с 1969 по 1994 г. были дополнены результатами измерений $f_0 E$ на сети японских станций ВЗ (далее — Москва и Япония) в табл. 1. Кроме того, возобновление регулярного мониторинга ионосферы в Москве с 2003 г. позволило привлечь к анализу новые данные регистрации вспышечных явлений.

Как можно видеть из табл. 1, количество зарегистрированных вспышечных явлений заметно менялось от одного пункта измерений к другому. В одних случаях это объяснялось техническими причинами, в других — степенью экранировки регулярного слоя E спорадическими слоями E_s, в третьих — различиями в долготе. Из-за этого моменты одних и тех же вспышек на одних станциях приходились на светлое время суток с достаточно хорошо развитым слоем E, а на других — на сумерки со слабо развитым слоем E. По причине восьмичасовой разницы в пояском времени между Москвой и Японией массив вспышек по данным японских станций практически не пересекается с рядами вспышек, зарегистрированных в Москве. Таким образом, всего было обработано 176 случаев солнечных рентгеновских вспышек в Москве и 361 — на станциях Японии. Когда на нескольких японских станциях одна и та же вспышка

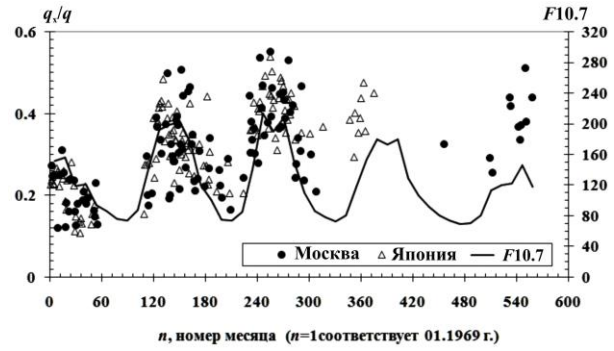


Рис. 1. Общая динамика изменений отношения q_x/q , найденного по вспышкам, зарегистрированным в Москве и Японии, а также среднемесячные значения F10.7

регистрировалась одновременно, найденные по ним значения q_x/q усреднялись. В результате к анализу привлечены 243 значения q_x/q .

2.1. Зависимость q_x/q от солнечной активности

На рис. 1 показаны результаты оценок параметра q_x/q в Москве (1969–2015 гг.) и Японии (1969–1994 гг.), рассчитанные по формуле (1).

Из него видно, что, во-первых, в обоих регионах абсолютные значения отношения q_x/q близки друг другу. Во-вторых, общей особенностью в них является очевидная зависимость от солнечной активности (СА), которую можно выразить формулой:

$$q_x / q = (q_x / q)_0 + a F10.7. \quad (3)$$

В табл. 2 приведены коэффициенты линейной зависимости между значениями q_x/q и F10.7, определенные для каждого цикла или полуцикла СА.

Можно видеть, что для обоих регионов средние за весь период измерений коэффициенты a близки. Вместе с тем, начальные значения q_x/q для каждого цикла СА $(q_x/q)_0$ возрастают от цикла к циклу в обоих регионах. На рис. 2, а, б показаны зависимости q_x/q от F10.7 для неполного 20-го и двух полных — 21-го и 22-го циклов СА в обоих регионах. Заметный рост начальных значений $(q_x/q)_0$ от цикла к циклу по данным Москвы и Японии указывает на наличие дополнительного фактора, помимо СА.

2.2. Зависимость от сезона

Для анализа зависимости q_x/q от сезона их среднемесячные значения приводились к среднему уровню солнечной активности для всех случаев регистрации вспышек. Поскольку вспышечные явления редко наблюдаются в периоды низкой солнечной активности (см. рис. 1), этот уровень соответствовал $F10.7 = 170$. Анализ показал, что сезонные вариации $(q_x/q)_{170}$ как в Москве, так и в Японии не только близки друг другу, но, и это главное, они невелики (рис. 3). Исключение составляет аномально низкое значение $(q_x/q)_{170}$ в январе для Москвы. Это отклонение, вероятно, объясняется малым количеством регистрации вспышек, обусловленным особенностями развития зимнего слоя E на широтах Москвы. Вместе с тем, в обоих регионах отношение

Таблица 1

Координаты станций, периоды наблюдений и количество вспышек

Станция	Широта, N	Долгота, E	Период, годы	Число вспышек, <i>n</i>
Москва	55.5	37.3	1969–2017	176
Вакканай	45.4	141.7	1969–1986	124
Акита	39.7	140.1	1969–1984	35
Кокубунджи	35.7	139.5	1970–2000	136
Ямагава	31.2	130.6	1969–1986	56
Окинава	26.3	127.8	1979–1986	10

Таблица 2

Линейная зависимость q_x/q от F10.7 в пределах цикла (полуцикла) SA

№ цикла	Москва					Япония					
	SA	Период	<i>n</i>	$(q_x/q)_0$	<i>a</i>	R^2	Период	<i>n</i>	$(q_x/q)_0$	<i>a</i>	R^2
20 (0.5)	02.69–07.73	25	0.0965	0.0007	0.264	01.69–05.73	29	0.0173	0.0013	0.612	
21 (1.0)	04.78–07.85	40	0.1160	0.0010	0.294	01.78–01.85	48	0.1457	0.0010	0.319	
22 (1.0)	02.86–08.94	35	0.2243	0.0008	0.283	02.86–04.95	40	0.2167	0.0009	0.495	
23 (0.5)	нет наблюдений					11.97–03.00	9	0.2157	0.0013	0.381	
24 (0.5)	12.06–06.15	11	0.1833	0.0015	0.502						
	Среднее		0.1550	0.0010	0.335	Среднее		0.1489	0.0011	0.452	

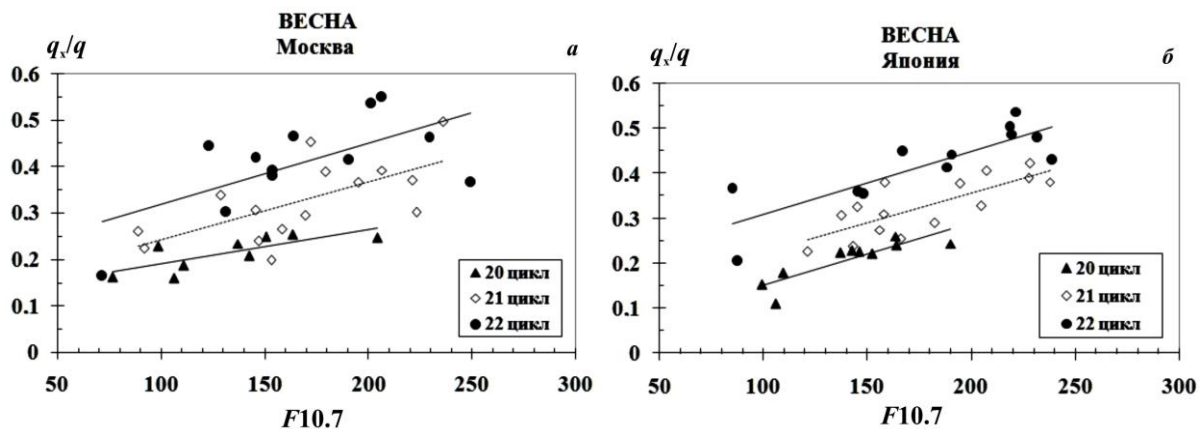


Рис. 2. Зависимость q_x/q от F10.7 в 20-м, 21-м и 22-м циклах солнечной активности по данным Москвы (а), Японии (б)

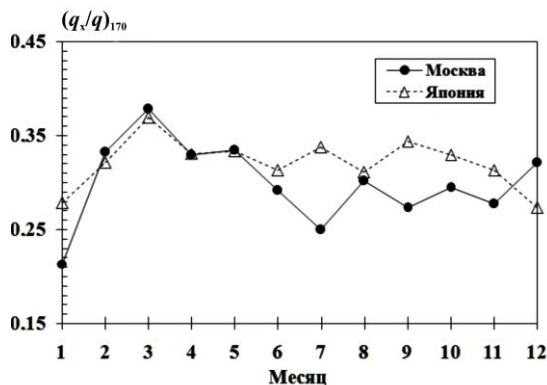


Рис. 3. Сезонные вариации отношения $(q_x/q)_{170}$ в Москве и Японии

$(q_x/q)_{170}$ достигает максимума в марте, тогда как летом и осенью оно всюду принимает промежуточные значения.

2.3. Широтно-долготная зависимость q_x/q

Чтобы исключить возможное влияние циклических вариаций на широтно-долготную структуру распределения параметра q_x/q , рассматривались данные измерений, соответствующие максимальной фазе одного цикла солнечной активности. Наиболее оптимальный в этом смысле период пришелся на четырехлетие (1979–1982 гг. со средним значением F10.7=208). Средние отношения q_x/q за каждый из рассматриваемых годов для каждой из японских станций и для Москвы показаны в табл. 3.

Усредненные за четыре года наблюдений значения q_x/q_0 на всех пунктах измерений показаны на рис. 4. Из него как будто можно видеть тенденцию роста q_x/q_0 с ростом широты. Однако она выражена столь слабо, что не выходит за пределы $\pm 4.2\%$ относительно среднего для всех станций значения q_x/q , равного 0.347. В соответствии с моделью MSIS

Таблица 3

Значения q_x/q , полученные на разных станциях при высокой СА

Год	q_x/q					
	Москва	Вакканаи	Акита	Кокубунджи	Ямагава	Окинава
1979	0.345	0.375	0.410	0.340	0.310	0.456
1980	0.300	0.350	0.364	0.340	0.350	0.272
1981	0.390	0.325	0.359	0.320	0.386	–
1982	0.364	0.339	0.329	0.325	0.306	0.315
Сред.	0.350	0.347	0.366	0.331	0.338	0.348

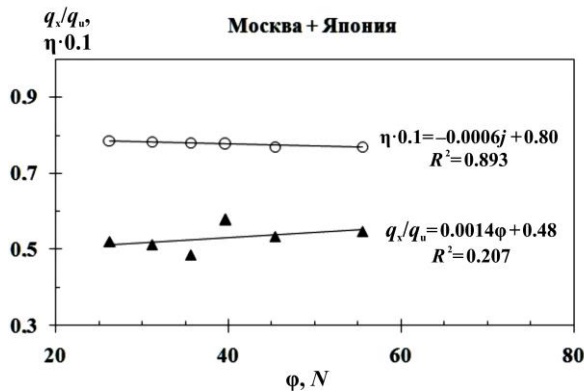


Рис. 4. Широтный ход (темные треугольники) экспериментальных значений q_x/q_u , усредненных по данным Москвы и Японии в период весеннего равноденствия (март, апрель, май); широтная зависимость (светлые кружки) отношения $\eta = \{[N_2] + [O_2] + [O]\} / [O_2]$, определенного для высот 105–115 км 15 марта 1981 г. и координат станций из табл. 1 по модели MSIS [Hedin, 1991]

широтный ход соотношения N_2 , O_2 и O (параметра η) в пределах указанных границ также мало заметен. Следовательно, нет причин ожидать обнаружения каких-либо заметных особенностей и в пространственном распределении параметра η .

Кроме того, как эмпирические q_x/q_u , так и модельные значения η , характеризующие пространственные вариации газового состава верхней атмосферы на указанных высотах, не обнаруживают и значимых долготных эффектов. Для регионов, отстоящих друг от друга на восьмичасовые пояса, многолетние вариации отношения q_x/q_u практически одинаковы.

2.4. Общая оценка многолетнего тренда q_x/q

Поскольку отношение q_x/q лишь в малой степени зависит от сезона, а также от координат пункта наблюдения, но коррелирует с солнечной активностью и возрастает от цикла к циклу СА, общую динамику многолетней изменчивости среднегодовых значений q_x/q можно описать выражениями, определенными по данным наблюдений в период с 1969 по 1994 г., для Москвы

$$(q_x/q)_M(t) = 0.0068 \cdot год + 0.0012 \cdot F10.7 - 13.343 \quad (4)$$

и для Японии

$$(q_x/q)_Я(t) = 0.0076 \cdot год + 0.0012 \cdot F10.7 - 14.934, \quad (5)$$

где год начинается с 1969.

На рис. 5 а, б показаны временные вариации экспериментальных (среднегодовых) отношений $(q_x/q)_э$

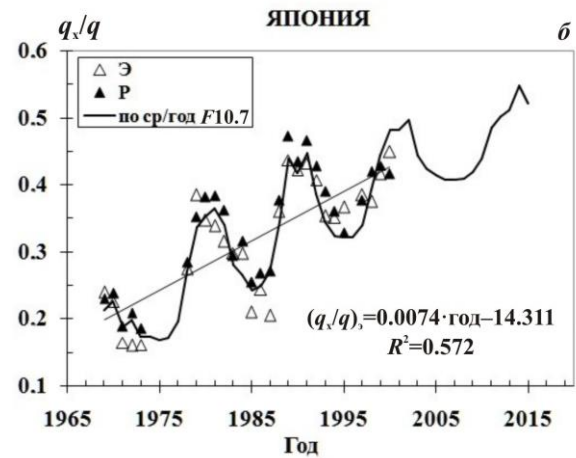
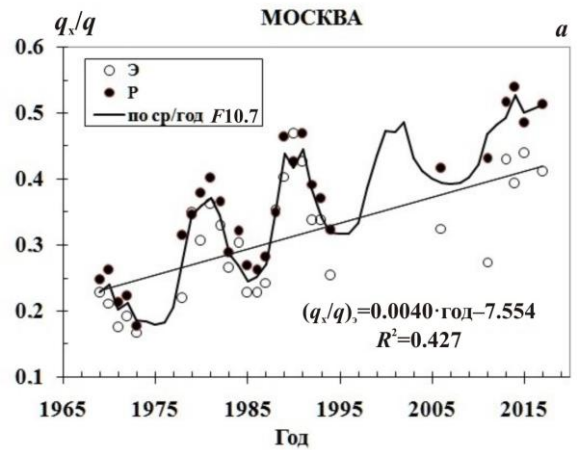


Рис. 5. Экспериментальные значения $(q_x/q)_э$ и $(q_x/q)_р$, рассчитанные по формулам (4), (5) для Москвы и Японии, а также q_x/q , рассчитанные по формуле (6) по среднегодовым значениям $F10.7$. Сплошные прямые — линейные тренды экспериментальных значений $(q_x/q)_э$ в обоих регионах

и их расчетные оценки $(q_x/q)_р$, найденные по формулам (4), (5). Как можно видеть из рис. 5, б, в Японии имело место почти полное совпадение значений $(q_x/q)_э$ и $(q_x/q)_р$. В Москве после 2003 г. расхождение между экспериментальными и расчетными значениями q_x/q было довольно велико, что отразилось на различии их линейных трендов. В Японии он составил 0.0074/год, в Москве — 0.0040/год. Это может объясняться двумя причинами. Во-первых, заметным снижением солнечной активности и крайне редкими случаями наблюдений вспышек. Так, например, в 2004 г. в Москве была отмечена одна вспышка,

в 2010 г. — две, в 2013 г. — две, а после 2017 г. — ни одной. Во-вторых, возможным изменением спектра ионизирующего излучения Солнца, сопровождающим общее падение его активности, наблюдающееся в 23-м и 24-м циклах. Так или иначе, вопрос остается открытым.

Сходство значений $(q_x/q)_p$, определенных по среднегодовым значениям $F10.7$ для Москвы и Японии, позволяет представить обобщенную формулу многолетнего тренда q_x/q , характеризующего общую динамику изменчивости этого параметра. В пределах средних широт Северного полушария он примет вид

$$q_x / q(t) = 0.0072 \text{ год} + 0.0012 F10.7 - 14/139. \quad (6)$$

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Оценивая возможные долговременные последствия парникового эффекта для газового состава атмосферы, авторы работы [Roble, Dickinson, 1989] отметили, что гипотетический двукратный рост содержания CO_2 и CH_4 способен заметно уменьшить концентрации N_2 , O_2 и O уже с высот 80 км. По их оценкам концентрация O_2 на высоте 120 км должна понизиться на ~40 %, $[\text{N}_2]$ — на ~30 % и $[\text{O}]$ — на ~20 %. В работе [Rishbeth, 1990; Rishbeth, Roble, 1992] проведена оценка последствий изменений критической частоты f_oE и высоты максимума h_mE слоя E ионосферы. Расчеты показали, что изменения коснутся прежде всего h_mE : она должна будет понизиться на ~2.5 км. Частота f_oE должна была бы возрасти, но незначительно, меньше погрешности измерений, равной ± 0.05 МГц [<https://www.sws.bom.gov.au/IPSHosted/TNAG/uag.htm>].

С 1996 по 2002 г. наблюдения в Москве не проводились ввиду отсутствия измерительной техники. Для того чтобы восполнить недостающее звено в ряду данных непрерывных наблюдений, определялась зависимость f_oE от SA в каждом полуцикле спада и подъема SA с 1947 по 2020 г. по формуле

$$f_oE = (f_oE)_0 + a F10.7, \quad (7)$$

где $(f_oE)_0$ — значение f_oE в начале каждого полуцикла SA ; $F10.7$ — текущий среднегодовой индекс солнечной активности; a — коэффициент связи f_oE с $F10.7$. Таким образом, были восстановлены значения f_oE , соответствующие годам, в которых измерения не проводились.

Они показали, что зависимость f_oE от солнечной активности высока, тем не менее, не абсолютна. Более того, со временем она незначительно, но меняется. В частности, за 74 года наблюдений коэффициент a возрос в 1.13 раз, при среднем за этот временной интервал значении $F10.7 = 123$. Это означает, что за время регулярного мониторинга ионосферы газовый состав нижней термосферы менялся таким образом, что реакция области E на солнечное ионизирующее излучение становилась в целом все более выраженной.

Что касается параметра h_mE , следует отметить, что в методе ВЗ определяется не истинная высота максимума слоя, а его действующая высота $h'E$. Различие между ними состоит в следующем. Параметр h_mE находится по данным измерений высотного распределения N_e преимущественно в ракетных экс-

периментах. На их основе строятся эмпирические модели ионосферы [Фаткуллин и др., 1981; Bilitza, 1997]. В первой модели h_mE признается переменной величиной, зависящей от ряда гелиогеофизических условий и меняющейся в пределах 108–115 км. В модели IRI, напротив, принято, что $h_mE = 110$ км независимо от условий наблюдения. Но поскольку это не соответствует действительности, вариативность текущих значений h_mE оценивается по данным о $h'E$, соответствующим тому или иному гелиогеофизическому условию.

Результаты расширения временного диапазона измерений и включения в них данных $h'E$ представлено на рис. 6 среднегодовыми значениями $h'E$ и $(f_oE)_{123}$, приведенными к среднему за весь рассматриваемый период значению $F10.7 = 123$. Разрывы в данных $h'E$ обусловлены не только техническими причинами, но также условиями их архивации.

Можно видеть, что середина 50-х гг. XX в. явилась переломным моментом в динамике многолетних трендов обоих ключевых параметров слоя E ионосферы. В частности, отрицательный тренд $(f_oE)_{123}$, сменив знак в 1957 г., до настоящего времени остается положительным. Таким образом, в целом за 74 года наблюдений линейный тренд среднегодовой частоты $(f_oE)_{123}$ был положителен, но слаб, и составил $+1.13 \cdot 10^{-3}$ МГц/год. В конечном счете, это привело к увеличению $(f_oE)_{123}$ не более, чем на 0.1 МГц, тогда как понижение $h'E$ и соответственно h_mE составило 3.5 км.

Вместе с тем реальное содержание CO_2 в атмосфере во второй половине XX в. повысилось с 315 до 415 ppm [<https://techcrunch.com/2019/05/12/co2-in-the-atmosphere-just-exceeded-415-parts-per-million-for-the-first-time-in-human-history>]. Иначе говоря, на высотах области E концентрация CO_2 за обсуждаемый интервал времени повысилась не в два, а не более чем в 1.32 раза. Следовательно, какие-либо долговременные изменения в частоте f_oE , не связанные с циклической активностью Солнца, не должны были бы наблюдаться. Однако они наблюдаются, и их невозможно объяснить ни ошибками измерений, ни способами обработки и анализа данных измерений. Тем самым они подтверждают предположение о том, что ионизирующее излучение Солнца является доминирующим, но не единственным фактором, контролирующим изменчивость параметров слоя E ионосферы.

В частности, это хорошо видно благодаря исключению влияния циклической изменчивости SA на частоту f_oE . Последнее достигается 11-летним усреднением методом скользящего среднего как $F10.7$, так и $(f_oE)_{123}$, а также оценкой линейного тренда 11-летних скользящих $(F10.7)_{11}$ и $((f_oE)_{123})_{11}$. Результаты такой операции показаны на рис. 7. Видно, что тренды обоих параметров значимы, но имеют противоположный знак.

В работе [Mikhailov, 2006] был сделан вывод о значимости геомагнитного контроля над долговременными трендами f_oE . Согласиться с этим утверждением сложно по следующим причинам. Во-первых, даже после сильных геомагнитных возмущений максимальные отклонения f_oE от невозмущенных значений не превышают 0.07 МГц [Beunon, Brown, 1959; Brown, Wynne, 1967; Иванов-Холодный, Нусинов,

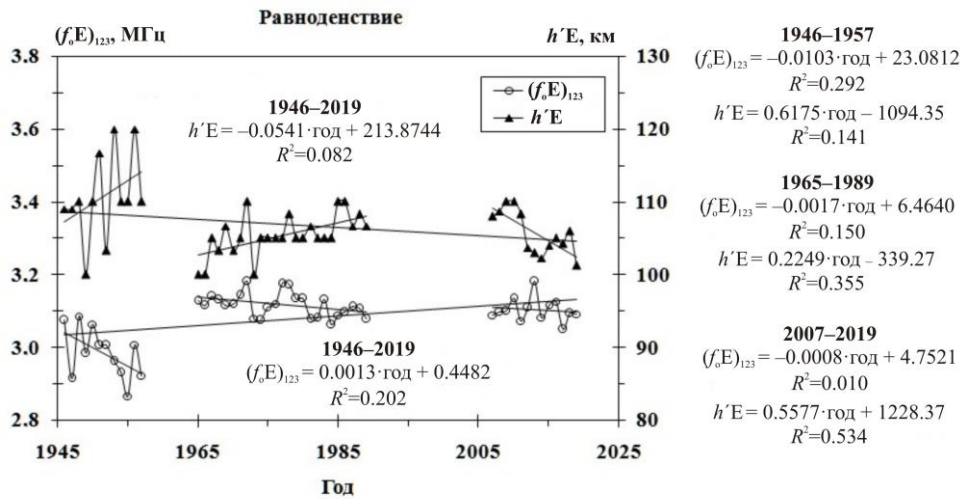


Рис. 6. Линейные тренды $(f_oE)_{123}$ и $h'E$ для трех временных периодов и в целом для всего периода наблюдений в Москве

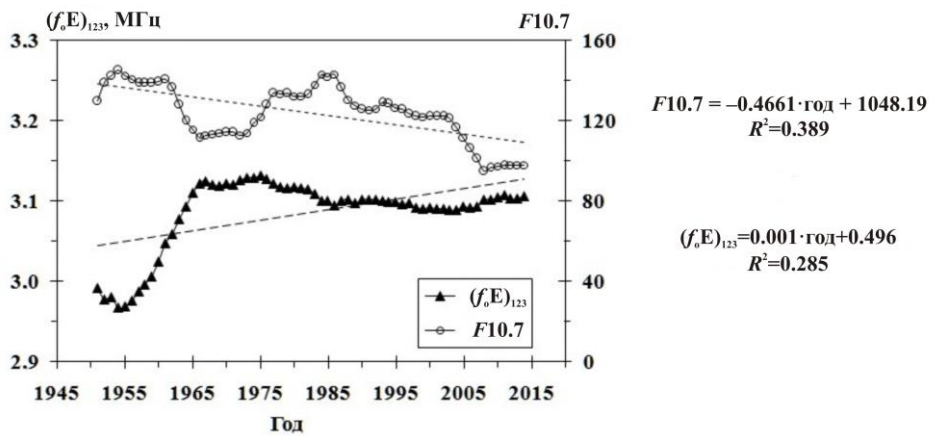


Рис. 7. Одиннадцатилетние скользящие средние индекса $F10.7$ и $(f_oE)_{123}$ по данным мониторинга в Москве, а также их линейные тренды

1979]. Кроме того, упомянутые отклонения наблюдались в течение лишь одного-двух дней непосредственно за пиком редких возмущений типа геомагнитных бурь.

Во-вторых, долговременная изменчивость геомагнитной активности состоит из периодической и хаотической составляющих. Аперриодический фактор значим на временных интервалах, ограниченных несколькими годами. Поэтому коэффициент корреляции между среднегодовыми значениями $F10.7$ и планетарным индексом геомагнитной активности K_p за период с 1946 по 2015 г. составил только 0.492. При усреднении методом одиннадцатилетнего скользящего среднего стохастическая компонента индекса K_p устраняется. При этом коэффициент корреляции между индексами $(F10.7)_{11}$ и $(K_p)_{11}$ резко возрастает и становится равным 0.931 (рис. 8).

Иначе говоря, геомагнитная активность на больших временных масштабах сама зависит от циклических вариаций СА, а поскольку солнечный фактор есть основной источник перемен как для геомагнитного поля, так и для ионосферы, вывод о существовании долговременного контроля геомагнитной активности над f_oE заведомо преувеличен. Это и было подтверждено в работе [Bremer, 1992].

Метод совместного анализа данных наземных измерений параметров слоя E и результатов спутни-

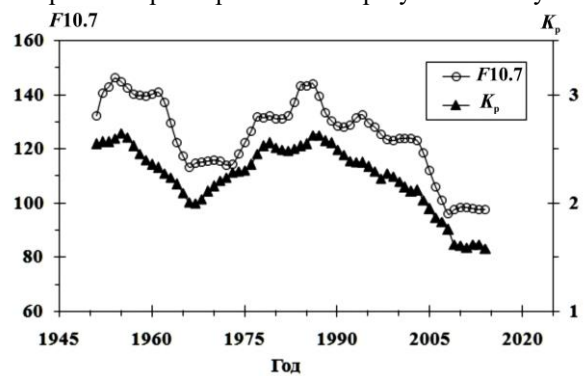


Рис. 8. Одиннадцатилетние сглаженные индексы солнечной — $F10.7$ и геомагнитной — K_p активности

ковых измерений потоков рентгеновского излучения Солнца дает неоспоримое свидетельство драматических изменений концентрации O_2 , происходящих на высотах нижней термосферы, но спутниковые измерения потоков рентгеновского излучения стали проводиться лишь с 1969 г. Поэтому оценки вклада этого излучения в суммарную скорость ионизации по указанной методике возможны только с этого вре-

мени. И они показывают, что тренд q_x/q резко контрастирует с трендом $(f_oE)_{123}$ за общий для них период времени. Если частота $(f_oE)_{123}$ повысилась менее чем на 3 % (см. рис. 6), отношение q_x/q , согласно рис. 5, а, выросло с 0.22 до 0.40, т. е. примерно в два раза.

Причина, объясняющая отмеченные долголетние (климатического масштаба) изменения параметров слоя E ионосферы и отношения q_x/q , с высокой степенью вероятности связана с уменьшением содержания O_2 в верхней атмосфере, поскольку только этот процесс объясняет всю совокупность последствий, а именно, повышение q_x/q и $(f_oE)_{123}$ с одновременным понижением $h'E$. При этом темп убывания $[O_2]$ заведомо превышает оценки [Roble, Dickinson, 1989], связанные с удвоением концентрации CO_2 в атмосфере.

Вместе с тем, приведенные оценки скорости уменьшения содержания O_2 на высотах, превышающих уровень турбопаузы, требуют уточнения, поскольку основаны на упрощенной схеме фотохимических реакций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выводы, касающиеся трендов q_x/q , $(f_oE)_{123}$ и $h'E$, могут быть сформулированы следующим образом.

1. Данные наземных измерений методом ВЗ и спутниковых измерений потоков рентгеновского излучения Солнца показали, что в регионе, охватывающем диапазон широт 26° – 56° N и долгот 37° – 128° E, отношение q_x/q возросло примерно вдвое с 1969 г.

2. В указанном регионе в скорости возрастания q_x/q не обнаружилось заметные ни долготные, ни широтные особенности. Сезонные вариации также были выражены слабо.

3. Расширение временного диапазона измерений методом ВЗ на ст. Москва до 74 лет подтверждает факт возрастания частоты $(f_oE)_{123}$ в целом. Однако ее линейный тренд был мал и незначим. Важно, однако, то, что его знак был противоположен тренду солнечной активности — параметру $F10.7$. Тренд $h'E$ был велик и значим.

4. Знаки трендов $(f_oE)_{123}$ и $h'E$ были противоположны и соответствовали прогнозируемым изменениям, обусловленным парниковым эффектом, однако их амплитуды многократно превышали реальный рост содержания CO_2 в атмосфере.

5. Совпадение знаков трендов $(f_oE)_{123}$ и q_x/q , а также их противоположность знаку тренда $h'E$ свидетельствует о том, что в их основе лежит общая причина — уменьшение концентрации O_2 , контролирующей критическую частоту и высоту максимума слоя E ионосферы.

Вместе с тем, эти выводы порождают два вопроса, ждущих своего решения.

1. Какова реальная скорость убыли O_2 ?
2. Что произошло в середине 50-х гг. XX в., что резко изменило знак и величину тренда $(f_oE)_{123}$ и $h'E$?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гивишвили Г.В., Иванов-Холодный Г.С., Лещенко Л.Н., Чертопруд В.В. Солнечные вспышки и газовый состав верхней атмосферы. *Геомагнетизм и аэрономия*. М.: Наука, 2005. Т. 45, № 2. С. 263–267.

Иванов-Холодный Г.С., Нусинов А.А. Образование и динамика дневного среднеширотного слоя E ионосферы. Труды Института прикладной геофизики. М.: Госкомгидромет, 1979. Вып. 37. 129 с.

Иванов-Холодный Г.С., Лещенко Л.Н., Одинцова И.Н. Соотношение рентгеновского и ультрафиолетового излучений солнечных вспышек в ионизации E-области ионосферы. *Геомагнетизм и аэрономия*. М.: Наука, 1976. Т. 16, № 2. С. 246–250.

Иванов-Холодный Г.С., Лещенко Л.Н., Нусинов А.А., Одинцова И.Н. Влияние сезонных вариаций нейтральной атмосферы на ионизацию E-области ионосферы. *Геомагнетизм и аэрономия*. М.: Наука, 1977. Т. 17, № 5. С. 839–846.

Фаткуллин М.Н., Зеленова Т.И., Козлов В.К. и др. *Эмпирические модели среднеширотной ионосферы*. М.: Наука, 1981. 255 с.

Beynon W.L.G., Brown G.M. Geomagnetic distortion of region-E. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1959. Vol. 14, iss. 1-2. P. 138–166. DOI: [10.1016/0021-9169\(59\)90062-5](https://doi.org/10.1016/0021-9169(59)90062-5).

Bilitza D. International Reference Ionosphere — Status 1995/96. *Adv. Space Res.* 1997. Vol. 20, no. 9. P. 1751–1754. DOI: [10.1016/S0273-1177\(97\)00584-X](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(97)00584-X).

Bremer J. Ionospheric trends in mid-latitude as a possible indicator of the atmospheric greenhouse effect. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1992. Vol. 54, no. 11-12. P. 1505–1511. DOI: [10.1016/0021-9169\(92\)90157-G](https://doi.org/10.1016/0021-9169(92)90157-G).

Brown W.J.G., Wynne R. Solar daily disturbance variation in the lower ionosphere. *Planet. Space Sci.* 1967. Vol. 15, iss. 11. P. 1677–1686. DOI: [10.1016/0032-0633\(67\)90006-2](https://doi.org/10.1016/0032-0633(67)90006-2).

Hedin A.E. Extension of the MSIS thermospheric model into the middle and lower atmosphere. *J. Geophys. Res.* 1991. Vol. 96, iss. 2. P. 1159–1172. DOI: [10.1029/90JA02125](https://doi.org/10.1029/90JA02125).

Mikhailov A.V. Trends in the ionospheric E-region. *Phys. Chem. Earth.* 2006. Vol. 31, iss. 1-3. P. 22–32. DOI: [10.1016/j.pce.2005.02.005](https://doi.org/10.1016/j.pce.2005.02.005).

Rishbeth H. A greenhouse effect in the ionosphere? *Planet. Space Sci.* 1990. Vol. 38, iss. 7. P. 945–948. DOI: [10.1016/0032-0633\(90\)90061-T](https://doi.org/10.1016/0032-0633(90)90061-T).

Rishbeth H., Roble R.G. Cooling of the upper atmosphere by enhanced greenhouse gases — modelling of thermospheric and ionospheric effects. *Planet. Space Sci.* 1992. Vol. 40, iss. 7. P. 1011–1026. DOI: [10.1016/0032-0633\(92\)90141-A](https://doi.org/10.1016/0032-0633(92)90141-A).

Roble R.G., Dickinson R.E. How will changes in carbon dioxide and methane modify the mean structure of the mesosphere and thermosphere? *Geophys. Res. Lett.* 1989. Vol. 16, iss. 7. P. 1441–1444. DOI: [10.1029/GL016i07p01441](https://doi.org/10.1029/GL016i07p01441).

Shieber J. CO2 in the atmosphere just exceeded 415 parts per million for the first time in human history. Mauna Loa Observatory. 2019.

URL: <https://www.sws.bom.gov.au/IPSHosted/TNAG/uag.htm> (дата обращения 20 февраля 2022 г.).

URL: <https://techcrunch.com/2019/05/12/co2-in-the-atmosphere-just-exceeded-415-parts-per-million-for-the-first-time-in-human-history> (дата обращения 20 февраля 2022 г.).

Как цитировать эту статью:

Гивишвили Г.В., Лещенко Л.Н. Многолетний тренд реакции E-слоя ионосферы на солнечные вспышки. *Солнечно-земная физика*. 2022. Т. 8, № 1. С. 51–57. DOI: [10.12737/szf-81202206](https://doi.org/10.12737/szf-81202206).