

## Анализ влияния солнечных протонных событий на содержание атмосферного озона по спутниковым данным SBUV

А.В. Шилкин

Государственное учреждение «Научно-производственное объединение «Тайфун»,  
249020 Обнинск, Победы, 4  
E-mail: shilkin@typhoon.obninsk.ru

Приведены результаты анализа влияния мощных солнечных протонных событий (СПС) на пространственные и временные вариации озона в стратосфере – нижней мезосфере. Представлены временные развертки вертикальных профилей озона от 37 до 70 км в периоды СПС 14 июля 2000, 4 ноября 2001 и 28 октября 2003 по среднезональным данным SBUV (Solar Backscatter Ultraviolet) для верхних широт. Полученные результаты указывают на уменьшения озона в нижней мезосфере до 60% в северных полярных широтах и до 35% в южных полярных широтах после вспышек. Корреляционный анализ среднезональных временных рядов озона в стратосфере – нижней мезосфере и рядов интегральной плотности потоков протонов высоких энергий и релятивистских электронов показал, что после вспышек близких к нулевому меридиану Солнца коэффициент корреляции приближается к значению «-1» на высотах 60 – 70 км. Наилучшую корреляцию имеют ряды озона и интегральной плотности потоков протонов с энергиями 10 – 100 МэВ на высотах 64 – 70 км и широтах 68 – 70 градусов северных и южных полярных широт.

**Ключевые слова:** солнечные протонные события, релятивистские электроны, стратосферный озон, корреляционный анализ.

### Введение

Солнечные вспышки влияют на интенсивность и спектральный состав солнечной радиации. В области интенсивных солнечных вспышек формируются потоки энергичных заряженных частиц (в основном протоны и электроны), которые достигают орбиты Земли через несколько часов после вспышки (солнечные протонные события – СПС) [2]. Магнитное поле Земли формирует потоки заряженных частиц в околоземном космическом пространстве, направляя их в верхние и умеренные широты. Глубина проникновения и распределение по широте частиц зависит от их энергетического спектра. В атмосфере Земли заряженные частицы вызывают ионизацию и диссоциацию молекул воздуха и приводят, к частности, к росту  $\text{NO}_x$  ( $\text{N} + \text{NO} + \text{NO}_2$ ) и  $\text{HO}_x$  ( $\text{H} + \text{OH} + \text{HO}_2$ ), которые активно разрушают молекулы озона в каталитических циклах Крутцена [6 – 7].

Целью настоящей работы является анализ изменчивости вертикального распределения озона в средней атмосфере полярных широт при наиболее мощных вспышечных событиях на Солнце.

### Описание данных

Для анализа использовались индексы вспышечной активности, которые содержат информацию о ежедневной интегральной плотности потоков (ИПП) протонов с энергиями  $>1$  МэВ,  $>10$  МэВ и  $>100$  МэВ и электронов с энергиями  $>0.6$  МэВ и  $>2$  МэВ в период с 1994

года по настоящее время [<http://www.swpc.noaa.gov/ftpmenu/warehouse.html>]. В качестве примера на рис. 1 изображены временные вариации ИПП протонов с энергиями 10 – 100 МэВ в 2001 году. Максимум 23 солнечного цикла пришелся на 2001 год, в котором произошло 6 мощных вспышек. После вспышки 4 ноября 2001 года ИПП протонов выросла на 5 порядков [1, 5].

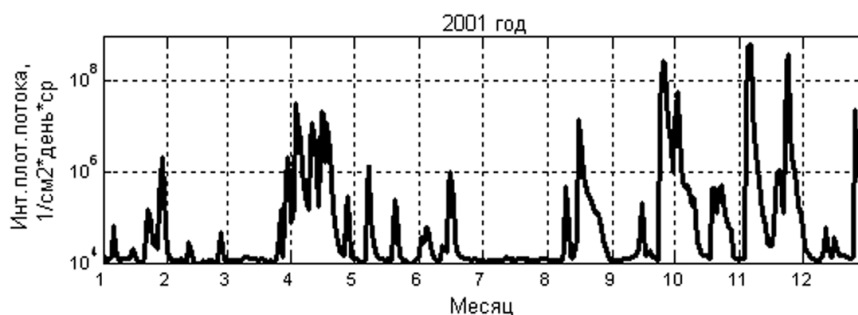


Рис. 1. Интегральная плотность потока протонов с энергиями от 10 до 100 МэВ в 2001 году

Анализ вариаций содержания озона в верхней стратосфере – нижней мезосфере проводился для среднедневных данных SBUV на спутниках Nimbus-7 и NOAA (9a, 9d, 11, 16) в период с 1982 по 2003 годы на сетке с пространственным разрешением  $1^\circ \times 1^\circ$  [<http://masiv.gsfc.nasa.gov/SBUVOzoneProfile.md>].

### Анализ вариаций $O_3$ в верхней стратосфере – нижней мезосфере

На рис. 2 построен годовой ход озона на высоте 70 км в зональном усреднении для северных и южных полярных широт 68 – 90 градусов. Вертикальными линиями на рисунке показаны дни мощных солнечных вспышек в 2001 году.

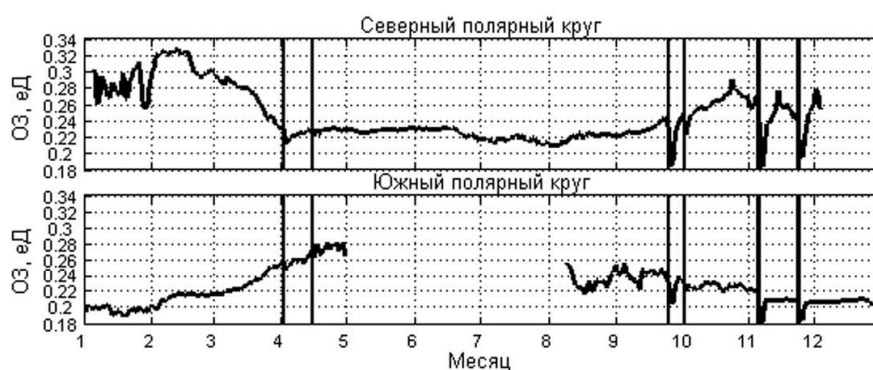


Рис. 2. Временные вариации среднезонального содержания озона на высоте 70 км в 2001 году. Вертикальные сплошные прямые – дни вспышек. По оси абсцисс – время в месяцах, по оси ординат – содержание озона в единицах Добсона

Из рисунка видно, что степень разрушения озона зависит от мощности вспышки по ИПП частиц. Наибольшее уменьшение озона следует за самой мощной вспышкой 4 ноября 2001 года. Следует отметить, что отклик озона на СПС более заметен в северных полярных широтах (СПШ), чем в южных полярных широтах (ЮПШ).

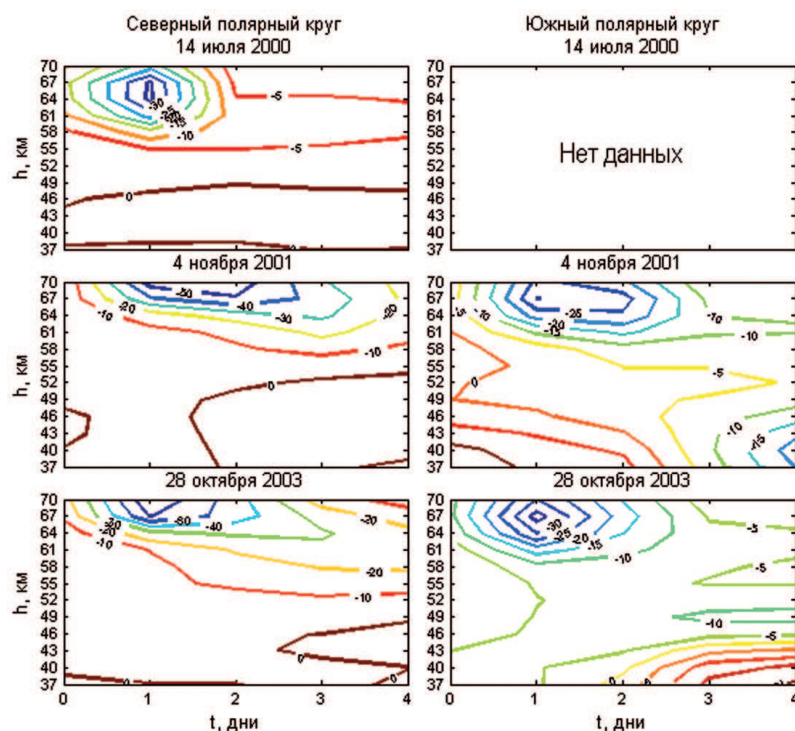


Рис. 3. Относительные изменения профилей озона (в %) для северных и южных полярных широт на высотах от 37 до 70 км в периоды трех мощных СПС 23-го солнечного цикла. По оси абсцисс – время в днях, по оси ординат – высота в километрах. Нулевой день – день вспышки

На рисунке 3 построены изменения среднезональных профилей озона относительно дня до вспышки для северных и южных полярных широт на высотах от 37 до 70 км в периоды трех мощных СПС 23-го солнечного цикла [5]. Нулевой день – день вспышки. Результаты исследования указывают, что наибольшее уменьшение озона последовало за вспышкой 28.10.2003 на высотах от 64 до 70 км. Уменьшение озона относительно дня перед вспышкой в северных полярных широтах составляет до 60%, в южных – до 35%. Далее по степени разрушения озона на втором месте СПС 4.11.2001 (50% в СПШ, 30% в ЮПШ) и на третьем месте СПС 14.07.2000 (30% в СПШ). Зональное усреднение данных всегда дает значение меньшее максимального, поэтому полученные результаты немного отличаются от результатов работ тех авторов, которые рассматривали локальные области полярных широт [3, 9, 10]. Согласно [10] вспышка 14.07.2000 характерна наибольшей плотностью потока кинетической энергии частиц за 23 солнечный цикл, но из трех вышеуказанных вспышек обладает наименьшей плотностью потока заряженных частиц. Принимая во внимание, что вспышка 14.07.2000 оказала меньшее влияние на атмосферный озон, чем вспышки 28.10.2003 и 4.11.2001 можно сделать вывод, что чем больше поток протонов более низких энергий, тем большее разрушение озона этот поток вызывает.

Можно привести аналогию с процессами, протекающими в ядерном реакторе, где скорость ядерной реакции зависит от количества тепловых нейтронов с энергиями 1 – 5 МэВ. Важно отметить понятие сечения взаимодействия частиц, от которого зависит вероятность протекания того или иного взаимодействия между налетающей частицей и мишенью. Чем меньше кинетическая энергия налетающих частиц, тем больше вероятность взаимодействия с частицей-мишенью. Конечно, для налетающей частицы есть нижний предел энергии, ниже которого взаимодействия с мишенью не будет, либо будут протекать другие реакции. Поэтому в случае атмосферных процессов не исключено, что потоки протонов низких

энергий могут вызывать рост концентраций озона. Что, по-видимому, и произошло на 2, 3 и 4 дни после вспышки 28.10.2003 в средней стратосфере южных полярных широт. Подобный эффект наблюдался в период СПС 8.09.2005 в работе [8] на тех же высотах в южных полярных широтах по спутниковым данным MLS (Microwave Limb Sounder) AURA. Вероятно, по мере проникновения вглубь атмосферы протоны замедлились до низких энергий и могли вызвать рост содержания озона на высотах 35 – 45 км.

Распределение солнечных заряженных частиц в атмосфере Земли по широте зависит от их энергии и наклона земной оси относительно эклиптики Земли. Поэтому местными весной и летом вспышечные частицы высоких энергий могут достигать умеренных широт и вызывать изменения в содержании озона. На рис. 4 построены широтные распределения изменения профилей озона относительно дня перед вспышкой на высотах 37 – 70 км по среднезональным данным SBUV на следующие дни после солнечных вспышек. В более освещенных Солнцем полушариях после вспышек наблюдаются уменьшения озона в нижней мезосфере вплоть до широт 50 – 40 градусов. После вспышки 14.07.2000 области с пониженным содержанием озона достигали широт 50 градусов обоих полушарий. Следует отметить, что местными весной и летом после вспышек уровень максимума уменьшения озона на 3 – 5 км ниже, чем местными осенью и зимой. Вероятно, это связано с большей тангенциальной составляющей кинетической энергии частиц при таком наклоне земной оси. Также, убыль озона в северных полярных широтах больше, чем в южных широтах, независимо от времени года (рис. 3 – 4).

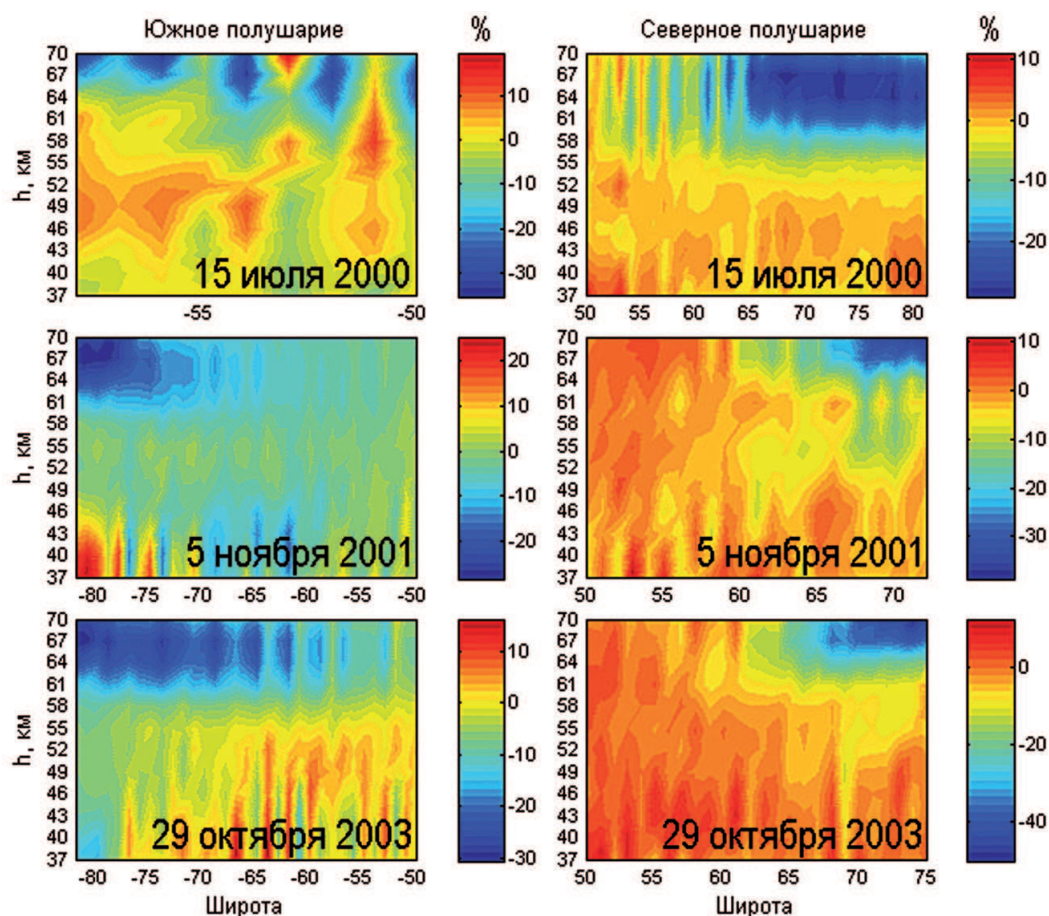


Рис. 4. Пространственные изменения содержания озона (в % относительно дня до вспышки) на следующие дни после СПС. По оси абсцисс – широта, по оси ординат – высота в километрах

## Корреляционный анализ временных рядов содержания озона и потоков заряженных частиц

Для корреляционного анализа использовались среднезональные ряды озона в широтной зоне 68 – 90 градусов северного и южного полушарий на высотах 37 – 70 км и ряды интегральной плотности потока протонов с энергиями 10 – 100 МэВ, более 100 МэВ, а также ряды ИПП релятивистских электронов с энергиями более 2 МэВ.

Корреляция между рядами озона и ИПП проводилась скользящим окном шириной 27 суток. Примерно такое же значение у периода обращения Солнца вокруг оси. На рис. 5 построены вертикальные профили коэффициента корреляции в периоды трех мощных СПС. В северных полярных широтах для СПС 14.07.2000 и в южных полярных широтах для СПС 4.11.2001 и 28.10.2003. Полученная корреляционная картина имеет сложную пятнистую структуру, однако сразу после вспышек в нижней мезосфере коэффициент корреляции рядов озона и ИПП протонов резко стремиться к значению «-1» и некоторое время остается близким к этому значению. Коэффициент определен с погрешностью 12%. В ноябре 2001 произошло 2 мощные вспышки, благодаря чему ряды содержания озона и ИПП протонов около полутора месяца имеют высокую степень корреляции. Длина участков с хорошей корреляцией зависит от того, сколько активных областей находится на видимом диске Солнца и от близости вспышки к нулевому меридиану. Это наблюдается после вспышки 14.07.2000, которая произошла вблизи нулевого меридиана (координаты N22W07), когда ее очаг еще долго оставался на видимом диске Солнца [2].

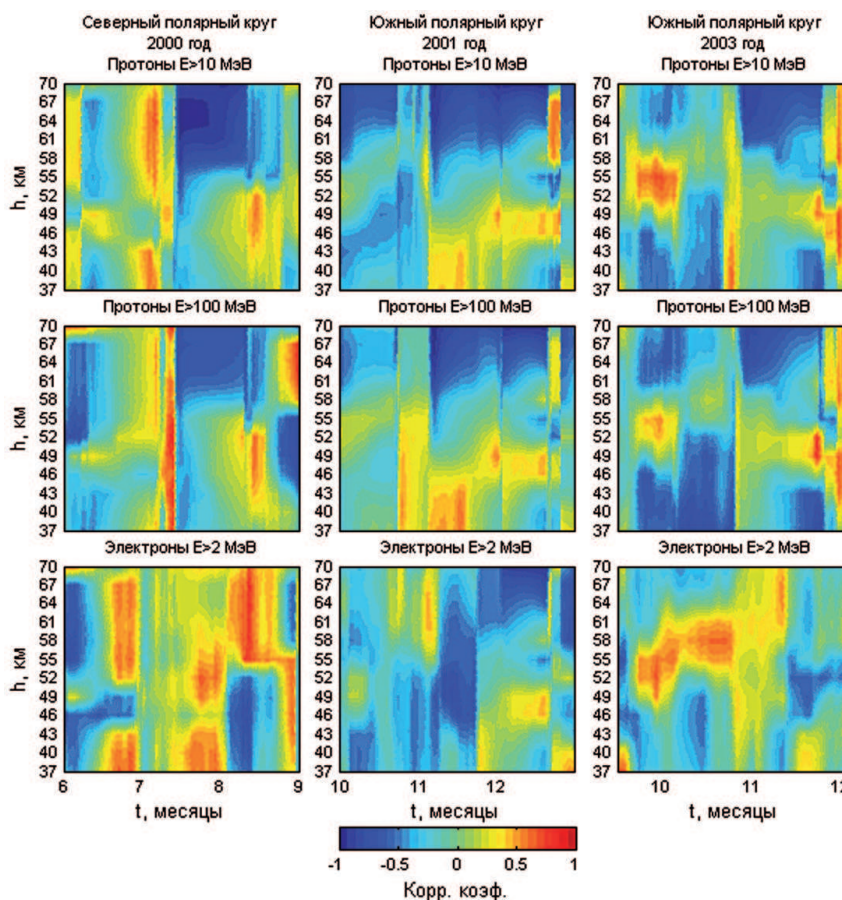


Рис. 5. Профили коэффициента корреляции между рядами содержания озона и ИПП солнечных заряженных частиц в периоды СПС. По оси абсцисс – время в месяцах, по оси ординат – высота в километрах

Другая ситуация складывается с корреляцией рядов озона и ИПП электронов. Коэффициент корреляции достигал значения близкого « $-1$ » с погрешностью 12% на высотах 60 – 70 км только после вспышки 22.11.2001. Скорее всего, это результат косвенной корреляции (ряды электронов имеют хорошую корреляцию с рядами протонов, а те в свою очередь – с рядами озона). Однако после вспышки 4.11.2001 в верхней стратосфере на высоте 49 км коэффициент корреляции был близок значению « $-0.8$ », когда как корреляции между рядами ИПП протонов и озона на этой высоте не было. После вспышки небольшой мощности 11.08.2000 в мезосфере коэффициент корреляции был близок значению « $0.8$ » с погрешностью 15%. В основном корреляция рядов электронов и озона соответствует границе уровня значимости.

Отметим, что с высотой знак корреляции иногда меняется (см. рис. 5). Скорее всего, это связано с замедлением частиц по мере их проникновения вглубь атмосферы и изменением сечения взаимодействия между ними и молекулами и атомами воздуха.

Для более детального анализа рассмотрим корреляцию среднезональных рядов озона на высоте 70 км и ИПП протонов с энергиями 10 – 100 МэВ за 2001 год. На рис. 6 изображены ряды коэффициента корреляции сплошной черной линией, вертикальные серые отрезки – погрешность коэффициента, вертикальные сплошные прямые – даты вспышек. Коэффициенты корреляции значимы там, где их погрешности не достигают нулевой линии. Оценка погрешности для коэффициента корреляции  $|r| < 0.4$  проводилась по критерию Стьюдента при размере выборки  $n = 27$ , а при  $|r| > 0.4$  для той же выборки использовался метод оценки Фишера.

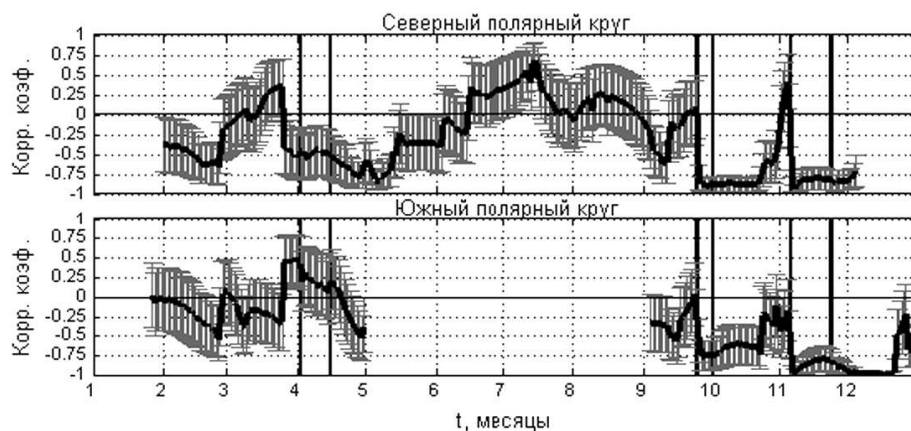


Рис. 6. Корреляция содержания озона и ИПП протонов с энергиями более 10 МэВ на высоте 70 км в 2001 году. Сплошная черная линия – коэффициент корреляции. Серые вертикальные отрезки – погрешность коэффициента. Вертикальные сплошные линии – даты вспышек

Обращает на себя внимание высокая степень корреляции для рядов озона и протонов в осенний период. После вспышек 24.09.2001 и 4.11.2001 коэффициент корреляции резко приблизился к « $-1$ ». Мощные вспышки 1.10.2001 и 22.11.2001 произошли на западном лимбе Солнца и почти не изменили степень корреляции. После вспышек 2.04.2001 и 15.04.2001 на западном лимбе коэффициент значим в СПШ и незначим в ЮПШ. Очень интересным является поведение коэффициента корреляции в зимне-весенний период до первой вспышки в 2001 году. Коэффициент меняется скачками с периодичностью приблизительно в 27 дней, что, скорее всего, связано с вращением активной области на Солнце. В этот период вспышек на Солнце еще не было, но по данным спутника NASA SOHO наблюдалось множество активных образований типа протуберанцев, корональных дыр и т. д.

## Заключение

Результаты исследования указывают на то, что за 23 солнечный цикл наибольшее уменьшение озона последовало за вспышками 28.10.2003, 4.11.2001 и 14.07.2003 в нижней мезосфере. Относительное уменьшение озона на высотах 60 – 70 км после вспышки 28.10.2003 в северных полярных широтах составляет до 60%, в южных – до 35%, в ОСО – 2% для СПШ. Далее по степени убыли озона на втором месте СПС 4.11.2001 (50% в СПШ, 30% в ЮПШ) и на третьем месте СПС 14.07.2000 (30% в СПШ). Модельные расчеты изменения в содержании озона для локальных областей в работах авторов [3, 9, 10] показали, что максимум уменьшения озона на 70° СШ достиг после СПС 4 ноября 2001 г.: 95% на высотах 58 – 80 км. Результаты настоящей работы получены для зонально-усредненных данных и несколько отличаются от результатов работ других авторов, выполненных для локальных областей в период СПС 28.10.2003. Для сравнения результатов исследований краткая сводка приведена в таблице 1 по четырем методикам: по данным SBUV; модельные расчеты [3, 9, 10]; по данным MIPAS (The Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding) [11]; по данным SCIAMACHY [12].

Таблица 1. Сравнение результатов исследования влияния СПС на озон средней атмосферы с результатами [3, 9, 10, 11, 12]

Методики	SBUV, %		Модель, %		MIPAS, %		SCIAMACHY, %	
Высота	60 – 70 км		40 – 60 км		60 – 70 км		50 – 65 км	
Широты	СПШ	ЮПШ	СПШ	ЮПШ	СПШ	ЮПШ	СПШ	ЮПШ
28.10.2003	60	35	42.9	–	60 – 70	35	50	20
4.11.2001	50	30	72.8	–	–	–	–	–
14.07.2000	30	–	55.8	8	–	–	–	–

Корреляционный анализ рядов озона на высотах 37 – 70 км по среднезональным данным SBUV и рядов интегральной плотности потока протонов и электронов высоких энергий показал, что после вспышек, близких к нулевому меридиану Солнца, коэффициент корреляции резко приближается к значению «–1» на высотах 60 – 70 км для рядов озона и протонов. Наилучшую корреляцию имеют ряды озона и ИПП протонов с энергиями 10 – 100 МэВ на высотах 64 – 70 км и широтах 68 – 70 градусов северных и южных полярных широт.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 10-05-00356).

## Литература

1. Вишератин К.Н., Шилкин А.В. Влияние вспышечной активности Солнца на общее содержание озона // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2009. Вып.6. Т.2. С.95-103.
2. Ишков В.Н. Солнечные экстремальные события: история, осуществление, прогноз // Солнечно-земная физика, 2005. Вып.8. С.19-23.
3. Криволицкий А.А. Результаты российских исследований средней атмосферы (2003 – 2006 гг.) // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2009. Т.45. №4. С.1-13.
4. Шилкин А.В., Вишератин К.Н. Вариации индексов солнечных корпускулярных потоков и вариации глобального содержания озона // Международный симпозиум по атмосферной радиации и динамике (МСАРД). Санкт-Петербург: СПбГУ, 2009. С.120.

5. Шилкин А.В. О влиянии солнечных вспышек на содержание атмосферного озона // Тезисы докладов конференции молодых специалистов. Обнинск: ООО «Принт-Сервис». 2010. С.159-162.
6. Crutzen P.J. The influence of nitrogen oxides on the atmospheric ozone content // Journal of the Royal Meteorological Society, 1970. Vol.96. P.320-325.
7. Crutzen P.J., Isaksen I.S.A. and Reid G.C. Solar proton events: stratospheric sources of nitric oxide // Science, 1975. Vol.189. №4201. P.457-459.
8. Damiani A., Storini M., Laurenza M. and Rafanelli C. Solar particle effects on minor components of the Polar atmosphere // Annales Geophysicae, 2008. №26. P.361-370.
9. Krivolutsky A.A., Kuminov A.A., Vyushkova T.Yu., Kuznetsov S.N. and Myagkova I.N. Changes in the earth's ozonosphere due to ionization of high-latitude atmosphere by solar protons in October, 2003 // Cosmic research, 2004. Vol.42. №6. P.626-635.
10. Krivolutsky A.A., Kuminov A.A., Kukoleva A.A., Repnev A.I., Pereyaslova N.K. and Nazarova M.N. Solar Proton Activity during Cycle 23 and Changes in the Ozonosphere: Numerical Simulation and Analysis of Observational Data // Geomagnetism and aeronomy, 2008. Vol.48. №4. P.432-445.
11. López-Puertas M., Funke B., Gil-López S., von Clarmann T., Stiller G.P., Höpfner M., Kellmann S., Fischer H., Jackman C.H. Observation of NO<sub>x</sub> enhancement and ozone depletion in the Northern and Southern Hemispheres after the October – November 2003 solar proton events // Journal of geophysical research, 2005. Vol.110. P.A09S43.
12. Rohen G., von Savigny C., Sinnhuber M., Llewellyn E.J., Kaiser J.W., Jackman C.H., Kallenrode M.-B., Schröter J., Eichmann K.-U., Bovensmann H. and Burrows J.P. Ozone depletion during the solar proton events of October – November 2003 as seen by SCIAMACHY // Journal of geophysical research, 2005. Vol.110. P.A09S39.

## **Analysis of the influence of solar proton events for the content of atmospheric ozone according to the SBUV satellite data**

**A.V. Shilkin**

*RPA “Typhoon”*

*4 Pobeda str., Obninsk, Kaluga Region, 249020*

*E-mail: shilkin@typhoon.obninsk.ru*

The results of analyzing the influence of powerful solar proton events (SPE) on the spatial and temporal variations of ozone in the stratosphere and lower mesosphere are presented. The time series of ozone vertical profiles from 37 to 70 km are shown during SPEs of July 14, 2000, November 4, 2001 and October 28, 2003 according to the SBUV zonal mean data in high latitudes. The results obtained indicate ozone depletion in the lower mesosphere of up to 60% in the northern polar latitudes and up to 35% in the southern polar latitudes after the flares. A correlation analysis of zonal mean ozone time series in the stratosphere and lower mesosphere, as well as of series of integrated flux density of high-energy protons and relativistic electrons showed that after sun flares near at zero meridian correlation coefficient approaches to the value of «-1» at altitudes of 60 – 70 km. The best correlation is series of ozone and integrated flux density of protons with energies 10 – 100 MeV at altitudes of 64 – 70 km and 68 – 70 degrees of the north and south polar latitudes.

**Keywords:** solar proton events, relativistic electrons, stratospheric ozone, correlation analysis.