

14. Rogalyov A. N. Computation of reachable sets guaranteed bounds // Control, Diagnostics, and Automation (ACIT-CDA-2010) : Proc. of the IASTED Intern. Conf. on Automation, Control, and Inform. Technology. Calgary, Canada, 2010. P. 132–139.

15. Вирт Н. Алгоритмы + структуры данных = программы. М. : Мир, 1985.

16. Руденко Ю. И., Ушаков И. А. К вопросу оценки живучести сложных систем энергетики // Изв. АН СССР. Серия : Энергетика и транспорт. 1979. № 1. С. 14–19.

A. N. Rogalyov

#### IMPLEMENTATION OF CONTRIBUTED METHODS OF CONTAINMENT OF VIABLE TRAJECTORIES OF CONTROLLED SYSTEMS

*The article describes implementation of contributed methods, which give the bounds of the trajectory of controlled systems, remaining (viable) to a certain time within a given set. Such quantitative estimations are bounds of reachable sets, satisfying the conditions of survival. Examples of computations of surviving trajectories bounds are presented.*

*Keywords: guaranteed bounds of the reachable sets, viable trajectories.*

© Рогалев А. Н., 2011

УДК 551.510.534

Т. В. Рублева, В. Б. Кашкин, В. М. Мясников, С. А. Селиверстов

#### ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПОЛЯРНОГО СТРАТОСФЕРНОГО ОЗОНА ЮЖНОГО ПОЛУШАРИЯ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ (АППАРАТУРА TOMS, OMI)

*Рассмотрены пространственно-временные особенности весенней озоновой аномалии в Антарктиде (озоновой дыры). На основе спутниковых данных и с помощью корреляционно-экстремального алгоритма рассчитаны зональные скорости масс озона в южной полярной стратосфере. Приведены результаты расчетов площади озоновой дыры для области, где общее содержание озона (ОСО) меньше 220 единиц Добсона, и дефицита массы озона в стратосфере над Антарктидой. Обнаружена тесная связь дефицита массы озона в озоновой дыре и зональной скорости области накопления общего содержания озона в циркумполярном вихре за 1996–2009 гг.*

*Ключевые слова: истощение озонового слоя, динамика нижней стратосферы.*

Исследование вариаций параметров озоносферы и поиски физических причин этих изменений до настоящего времени остаются проблемой, актуальность которой определяется существенной ролью озона в сложной системе «Солнце – атмосфера – поверхность Земли – космос». Поглощая ИК-излучение Земли в полосе 9,57 мкм, озон вносит вклад в изменение температуры атмосферных слоев, а поглощая УФ-излучение Солнца в диапазоне 200...320 нм, он влияет на температурную стратификацию стратосферы, регулируя в этом слое планетарные тепловые и циркуляционные процессы.

С экологической точки зрения наиболее важен стратосферный озон, максимальная концентрация которого приходится на область высот 16...25 км (нижнюю стратосферу). Если собрать весь озон в слой вблизи поверхности Земли при давлении 760 мм рт. ст. и температуре 0 °С, то толщина этого слоя, т. е. общее содержание озона (ОСО), составит всего около 3 мм, или 300 единиц Добсона (ЕД) (1 ЕД = 10<sup>-5</sup> м).

Несмотря на большое количество экспериментальных и теоретических исследований причины уменьшения общего содержания озона до сих пор не известны. По оценкам [1], до введения запрета на

производство озоноразрушающих веществ озоновый слой в северном полушарии истощался на 3,4 % за 10 лет, в Южном – на 4,8 %. После введения этого запрета в северном полушарии наблюдается уменьшение озона на 2,9 %, а в южном – на 1,0 %. Погрешность оценки скорости деградации ОСО не превышает 0,02 % за десятилетие. Эти оценки свидетельствуют о том, что уменьшение озонового слоя над северным полушарием происходит быстрее, чем над южным.

Проблема истощения озонового слоя обратила внимание на существующие межполушарные различия в сезонном ходе полярного стратосферного озона, особенно в весенний период [2]. Так, весной в северном полушарии ОСО снижается с 420 до 340 ЕД, а в южном – с 360 до 200 ЕД (рис. 1). Различия в значениях ОСО обусловлены особенностями циркуляционных процессов нижней стратосферы, а также климатическими изменениями в этих регионах.

Для Арктики характерна наибольшая межгодовая и внутрисезонная изменчивость суммарного озона. Сильное и устойчивое уменьшение ОСО в этом регионе началось в конце 1980-х гг., продолжалось до 1998 г. и сменилось периодом колебаний озона. Наи-

большие потери общего содержания озона – до 60...70 % по сравнению с многолетними средними значениями – обнаружены в холодные сезоны 1995/1996, 1999/2000, 2004/2005 гг. [3]. Убыль ОСО на 15...30 % по сравнению с климатической нормой выявлена в теплые зимы 2006/2007, 2007/2008 гг. [4]. Следовательно, уменьшение северного полярного озона в наибольшей степени зависит от метеорологических условий стратосферы, в том числе от изменения температуры внутри полярного вихря.

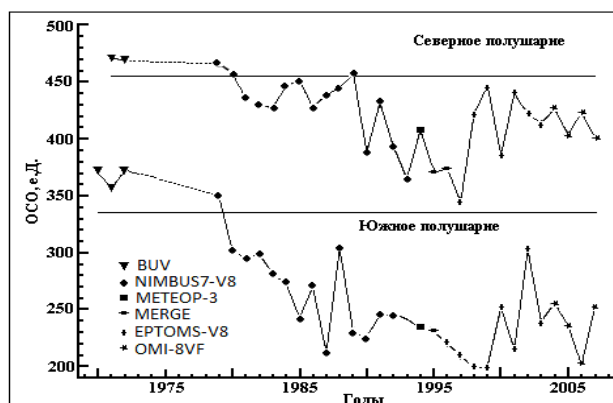


Рис. 1. Межгодовая изменчивость ОСО в полярных широтах по наземным и спутниковым измерениям в весенний период (для северного полушария – в марте, для южного – в сентябре): горизонтальные отрезки соответствуют климатической норме для полярных зон (среднему ОСО до 1983 г.)

В южной полярной области снижение весеннего максимума ОСО обнаружено Г. М. Добсоном в 1957 г. [5]. После 1970 г. наблюдалось несколько случаев, когда ежедневные значения  $X$  были ниже климатической нормы, т. е. 220 ЕД. В 1980-е гг. дефицит озона, достигавший 50...70 %, регулярно регистрировался на южнополярных антарктических станциях и метеонаблюдениях. В широтной области 70–90° ю. ш. над Антарктидой было обнаружено устойчивое понижение общего содержания озона в весенний период ниже 220 ЕД, названное *озоновой дырой*, или *весенней озоновой аномалией в Антарктиде* (ВОАА) [6; 7]. В стратосфере Арктики явление подобных масштабов не наблюдается. За годы исследований ВОАА:

- был выявлен период ежегодного существования аномальной области – с конца августа (после окончания полярной ночи) до декабря (3–3,5 месяца);
- установлены высоты падения концентрации озона на 95...97 % – 14...22 км;
- обнаружена тесная статистическая связь между уменьшением ОСО и понижением температуры  $T$  нижней стратосферы с коэффициентом корреляции  $> 0,9$ ;
- показано, что убыль суммарного озона происходит при условии выхолаживания стратосферы (до  $-90$  °С и менее).

К настоящему времени выдвинуты несколько теорий и гипотез о химических и динамических механизмах образования озоновой дыры. К сожалению, дальнейшие исследования ВОАА в основном были направлены на доказательство ее антропогенного

происхождения, т. е. фреонно-гетерогенной гипотезы, согласно которой основными факторами формирования антарктического минимума ОСО являются воздействия продуктов хлорфторуглеродов и гетерогенных реакций на поверхности частиц полярных стратосферных облаков (ПСО) [6]. Впоследствии в качестве дополнительного фактора был признан устойчивый циркумполярный вихрь (ЦВ) – кольцевая область с аномально высоким количеством озона [8]. Таким образом, было установлено, что вариации озонового слоя в южном полушарии не только имеют фотохимическую природу, но и обусловлены воздействием динамических факторов.

Целью данной работы является исследование пространственно-временных изменений аномального явления озоновой дыры в южной полярной стратосфере и ее взаимосвязи с циркумполярным вихрем, при этом весенняя озоновая аномалия в Антарктиде рассматривается как сложная циклоническая система, объединяющая две области: циркумполярный вихрь и собственно озоновую дыру, которые обладают различными пространственно-временными характеристиками.

В качестве исходных данных использовались результаты измерений общего содержания озона, сформированные на основе объединения данных спутниковой аппаратуры TOMS (версия V7, V8) и OMI за 1981–2009 гг. [9]. Данные об ОСО охватывают область 89,5° ю. ш. – 89,5° с. ш. и 179,375° з. д. – 179,375° в. д. Ежедневные данные для TOMS представлены на сетке с пространственным разрешением 1° по широте и 1,25° по долготе, для OMI – 1° и 1° соответственно. Разность отклонений между V7 и V8 для области 70° с. ш. – 70° ю. ш. составляет  $\pm 1...2$  ЕД. В полярных широтах северного полушария стандартное отклонение V8 превышает V7 на 10...14 ЕД, а в полярных широтах южного полушария – на 30 ЕД.

Для исследования динамических процессов в нижней стратосфере зональная скорость масс озона в южном и северном полушариях в весенний период рассчитывалась на основе метода, описанного в [10]. Как следует из карт изолиний поля ОСО, в течение нескольких последовательных суток основное изменение ВОАА связано с ее поворотом вокруг полюса. Поэтому в соседние дни циклические зависимости ОСО от долготы должны отличаться сдвигом на угол поворота за сутки. Между полем ОСО за определенный день и смещенным и повернутым на некоторый угол полем за предыдущий день имеется связь, выраженная коэффициентом корреляции. Наибольшее значение выборочного коэффициента корреляции, достигающее иногда 0,95...0,98, соответствует среднему за сутки смещению и повороту поля.

Анализ графика широтной зависимости зональной скорости переноса озона относительно поверхности Земли (усреднение по широтным зонам в 5° за 2000–2009 гг.) (рис. 2), показывает, что максимальные значения зональной скорости приходятся на область 45–55° в обоих полушариях и различаются в 1,6 раза. В области широт 30–60° движение воздушных масс происходит под воздействием отклоняющей

силы вращения Земли (силы Кориолиса). Горизонтальная составляющая силы Кориолиса действует перпендикулярно направлению движения воздушных масс: вправо в северном полушарии, влево в южном.

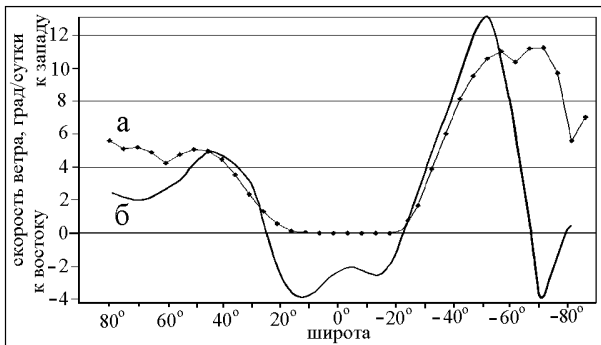


Рис. 2. Среднегодовая скорость зонального переноса озона в нижней стратосфере за 2000–2009 гг. (а) и скорость зонального переноса в тропосфере на уровне 850 гПа (б) [11]

В весенний период в средних широтах каждого из полушарий образуется интенсивный циркумполярный вихрь. В периоды существования циркумполярных вихрей скорости в нижней стратосфере и тропосфере на средних широтах максимальны. В нижней стратосфере полярных широт скорость зонального переноса остается достаточно большой, в тропосфере этих широт она падает, а в южном полушарии – меняет знак. В тропосфере тропического пояса преобладает восточный ветер, а в нижней стратосфере скорость зонального ветра близка к нулю.

Для большей наглядности приведем широтную зависимость скорости меридионального переноса озона, показывающего перенос масс озона в направлении «полюс–экватор», в южном полушарии за сентябрь (рис. 3). В весенний период в умеренных широтах зарегистрирован максимум общего содержания озона, а в полярной зоне находится антарктическая озоновая дыра, из которой озон вытекает со скоростью до 1,5 град./сут и закручивается в кольцо циркумполярного вихря на широтах от 30 до 55° ю. ш., где наблюдается увеличение общего содержания озона до 360 ЕД.

Установлено, что период с 1 сентября по 31 октября в южной полярной стратосфере характеризуется наибольшей динамической активностью (рис. 4). График на рис. 4 описывается нерегулярной кривой, показывающей, что переносы масс озона происходят в обоих направлениях. Однако к моменту максимума глубины дыры (28–30 сентября) преобладает отток (среднее значение скорости за сентябрь 0,33 град./сут), затем начинается приток (среднее значение скорости за октябрь – 1,22 град./сут). Нерегулярный характер кривой объясняется тем, что полученные данные относятся ко всей области дыры, на периферии которой происходят процессы оттока и притока масс озона, а вместе с тем имеет место смена меридиональной составляющей скорости движения масс озона. Следовательно, говорить о полной изоляции циркумполярным вихрем нижней стратосферы над Антарктидой во время существования озоновой дыры нельзя.



Рис. 3. Зависимость скорости меридионального переноса озона от широты за 1997–2008 гг. (широтная зона 70–75° ю. ш.) и средний профиль ОСО в южном полушарии в сентябре 2006 г.

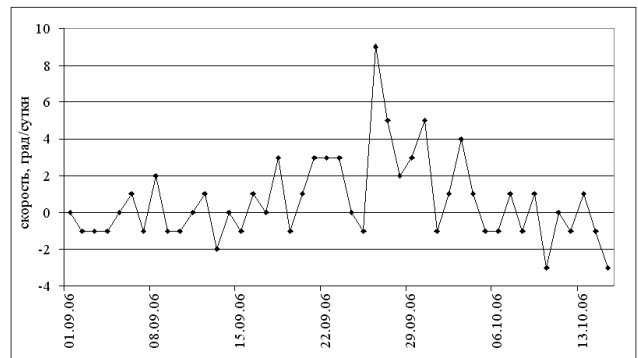


Рис. 4. Зависимость скорости меридионального переноса от времени в широтной зоне 70–75° ю. ш. (положительным значениям скорости соответствует отток масс озона в сторону циркумполярного вихря, отрицательным – приток озона из средних широт в озоновую дыру)

Для анализа параметров озоновой дыры использовались следующие характеристики: площадь ВОАА, внутри которой ОСО < 220 ЕД, и дефицит массы озона в широтной области вокруг южного полюса. Площадь озоновой дыры рассчитывалась как сумма площадей 288 сферических треугольников, одна из вершин которых лежит на полюсе с координатами  $(R, 0, 0)$ , а положения двух других вершин задаются величинами  $(R, \varphi_2, \lambda_2)$ ,  $(R, \varphi_3, \lambda_3)$ , где  $R = 6371$  км – средний радиус Земли. Площадь одного сферического треугольника рассчитывалась по формуле [12]:

$$S_{ph} = R^2 (\alpha + \beta + \gamma - \pi), \quad (1)$$

где внутренние углы треугольника  $\alpha, \beta, \gamma$  выражены в радианах, значения которых находятся из соотношений

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{k}{\sin(s-a)}, \quad \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} = \frac{k}{\sin(s-b)}, \quad \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} = \frac{k}{\sin(s-c)},$$

а длины сторон определяются из выражений

$$a = \frac{x_2 \cdot x_3 + y_2 \cdot y_3 + z_2 \cdot z_3}{R_e^2}, \quad b = (90 - \varphi_2) \cdot \pi / 180,$$

$c = (90 - \phi_3) \cdot \pi / 180$ , здесь  $x, y, z$  – сферические координаты. Граница области ВОАА задавалась исходя из климатической нормы, не превышающей 220 ЕД.

Сравним значения площади  $S_{ph}$ , рассчитанные по формуле (1), и  $S$ , приведенной в [13], для сентября–октября, когда площадь ВОАА была максимальной (рис. 5). Небольшое отличие в результатах обусловлено тем, что в случае площади  $S_{ph}$  граница области озоновой дыры задавалась с привязкой к географическим координатам, а в данных [13] граница области ВОАА, вероятно, интерполировалась. Обращает на себя внимание уменьшение площади в 1988 г. до  $13,09 \text{ м}^2$  ( $13,8 \cdot 10^6 \text{ м}^2$  по данным [13]). Анализ исходной спутниковой информации показал, что такое небольшое значение  $S_{ph}$  обусловлено тем, что значения ОСО для 20 сентября 1988 г. имеются только до  $\phi = -83,5^\circ$  и вычислить значения  $S_{ph}$  более точно не представляется возможным.

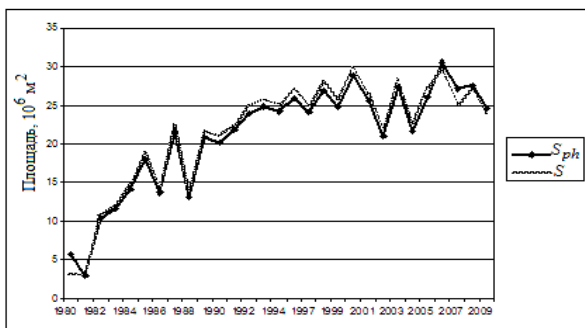


Рис. 5. Сравнение значений  $S_{ph}$  и  $S$  для сентября–октября, когда площадь ВОАА максимальна

Убыль ОСО в южной полярной области регистрировалась от 194 ЕД в 1979 г. до 73 ЕД в 1994 г. И если низкое значение ОСО 1994 г. связывают с выбросами вулканического аэрозоля, то как тогда объяснить экстремально низкое значение ОСО (82 ЕД), зарегистрированное 9 октября 2006 г.? Кроме того, за период 1980–2009 гг. максимальная площадь ВОАА  $S$  увеличилась до  $28,86 \text{ млн м}^2$  в 2000 г. (в 2006 г.  $S = 30,6 \text{ млн м}^2$ ), что составляет  $\approx 6\%$  земной поверхности. Таким образом, за тридцать лет озоновая дыра над Антарктидой стала глубже в 2,5 раза, а ее площадь увеличилась примерно в 30 раз.

Для расчета дефицита массы озона в области озоновой дыры использовалась формула [14]:

$$\Delta M = (220 - X_{cp}) \cdot 2,11 \cdot 10^{-5} \cdot S_{ph},$$

где  $\Delta M$  – дефицит массы озона;  $X_{cp}$  – среднее значение ОСО в области ВОАА за текущий день, ЕД;  $S_{ph}$  – площадь озоновой аномалии,  $\text{м}^2$ ;  $m_i$  – масса всех молекул озона в  $i$ -м слое,  $m_i = m_{oz} \cdot N_L = 2,1 \text{ кг/м}^3$ , здесь  $m_{oz} = 7,97 \cdot 10^{-26} \text{ кг}$  – масса молекулы озона,  $N_L = 2,68 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$  – число Лошмидта. Полученные значения  $\Delta M$  для дат минимума ОСО в озоновой дыре сравнивались с дефицитом массы озона  $OMD$  из [13] за аналогичные даты для периода 1982–2009 гг. (рис. 6). Коэффициент корреляции составил 0,97.

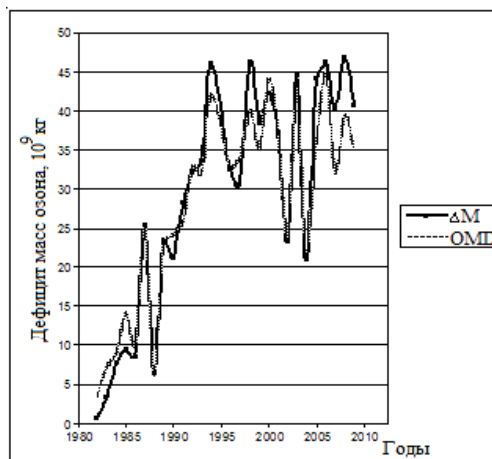


Рис. 6. Межгодовое изменение дефицита массы озона  $\Delta M$  и  $OMD$

Параметры  $S_{ph}$ ,  $S$ ,  $\Delta M$  и  $OMD$  характеризуют быстрый рост ВОАА до 1989 г. В последующие годы площадь и дефицит массы озона изменялись практически синхронно, причем чем больше площадь, тем меньше озона внутри ВОАА. В 1994 г. этот эффект был нарушен:  $S_{ph}$  озоновой дыры отличалась от ее средних размеров в 1991–1993 гг. на  $0,73 \cdot 10^6 \text{ м}^2$ , а  $\Delta M$  по отношению  $\Delta m_{cp}$  за этот период увеличился на  $14,6 \cdot 10^9 \text{ кг}$ . Минимум ОСО для этого периода уменьшился примерно на 28 ЕД (для 1994 г.  $X = 73 \text{ ЕД}$ ). Однако начиная с 1996 г. синхронность изменений значений  $S_{ph}$  и  $\Delta M$  восстановилась.

Анализ движения масс озона в направлении «экватор–полюс» позволил установить, что в период 1996–2009 гг. примерно за девять–двенадцать дней до минимума ОСО в озоновой дыре зональная скорость переноса озона значительно изменяется, причем за восемь–девять дней она возрастает, а затем за один–три дня уменьшается до  $X_{min}$ . По зональным данным ОСО выявлены широты накопления общего содержания озона в циркумполярном вихре, изменяющиеся с квазидвухлетней периодичностью:  $45\text{--}50^\circ$  и  $50\text{--}55^\circ$  ю. ш. Выявленные особенности учитывались при расчете средних значений в период возрастания зональной скорости переноса озона в максимуме ОСО (рис. 7). Получен коэффициент корреляции, равный 0,77. Этот результат свидетельствует о том, что уменьшение общего содержания озона в антарктической озоновой дыре сопровождается увеличением количества озона в циркумполярном вихре.

Таким образом, сделаем четыре важных вывода, которые следуют из представленных выше результатов:

- во-первых, уточнены значения дефицита масс озона в области антарктической озоновой дыры;
- во-вторых, установлено, что в сентябре озон утекает из ВОАА со скоростью до 1,5 град/сут;
- в-третьих, полная изоляция циркумполярным вихрем нижней стратосферы над Антарктидой во время существования озоновой дыры отсутствует;
- в-четвертых, обнаружена тесная связь дефицита массы озона в озоновой дыре со скоростью вращения

области накопления ОСО в циркумполярном вихре в южной полярной стратосфере за период 1996–2009 гг. (коэффициент корреляции 0,77).

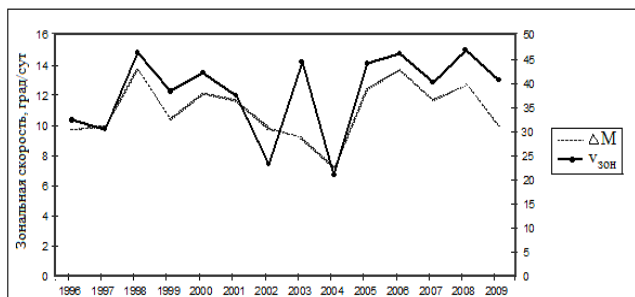


Рис. 7. Межгодовая изменчивость зональной скорости в области накопления общего содержания озона и дефицита массы озона в ВОАА

Полученные результаты будут использованы при исследовании динамических процессов, происходящих в нижней стратосфере, и изучении изменчивости суммарного озона в полярных широтах.

#### Библиографические ссылки

1. Кашкин В. Б., Романов А. А., Рублева Т. В. Исследование трендов спутниковых оценок общего содержания озона с использованием сингулярного спектрального анализа // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 4. С. 9–16.
2. Звягинцев А. М., Крученицкий Г. М. Озоновый кризис: 20 лет спустя // Россия в окружающем мире – 2005 : аналит. ежегодник / под ред. Н. Н. Марфенина, С. А. Степанова. М. : Модус-К–Этерна, 2006. С. 125–145.
3. Рекордное химическое разрушение озона в Арктике зимой 2004–2005 гг. / Н. Д. Цветкова, В. А. Юшков, А. Н. Лукьянов и др. // Изв. Рос. акад. наук. Серия : Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43, № 5. С. 643–650.
4. Рыскин В. Г., Куликов Ю. Ю. Результаты оценки химических потерь озона в стратосфере над Кольским полуостровом зимой 2002–2003 гг. по данным микроволнового зондирования // Изв. Рос. акад. наук. Серия : Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44, № 2. С. 199–205.
5. Dobson G. M. B. Forty years' research on atmospheric ozone at Oxford university: a history // Applied Optics. 1968. Vol. 7. № 3. P. 387–405.
6. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006. Global Ozone Research and Monitoring Project : Rep. № 50 / World Meteorological Organization. Geneva, 2007.
7. Звягинцев А. М., Крученицкий Г. М. Эволюция весенней антарктической озоновой аномалии: результаты наблюдений // Исслед. Земли из космоса. 2002. № 6. С. 1–9.
8. Khlebopros R. G., Okhonin V. A., Kashkin V. B. Catastrophes in nature and society: Mathematical Modeling of Complex Systems. London : World Sci. Publ., 2006.
9. NASA/Goddard Space Flight Center's Database [Electronic resource]. URL: <http://toms.gsfc.nasa.gov> (date of visit: 10.01.2005).
10. Кашкин В. Б., Рублева Т. В., Хлебопрос Р. Г. Природоохранная геофизика: проблемы озонового щита планеты // Инж. экология. 2009. № 4. С. 18–33.
11. Сидоренков Н. С. Физика нестабильностей вращения Земли. М. : Физматлит, 2002.
12. Корн Г. А., Корн Т. М. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М. : Наука, 1973.
13. Ozone Hole Watch [Electronic resource]. URL: <http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/> (date of visit: 12.01.2010).
14. Huck P. E. The Coupling of Dynamics and Chemistry in the Antarctic Stratosphere [Electronic resource]. URL: <http://hdl.handle.net/10092/1410> (date of visit: 14.03.2010).

T. V. Rubleva, V. B. Kashkin, V. M. Myasnikov, S. A. Seliverstov

#### VARIABILITY OF POLAR STRATOSPHERIC OZONE OF THE SOUTHERN HEMISPHERE BASED ON SATELLITE DATA (APPARATUS TOMS, OMI)

*Spatiotemporal features of Spring Ozone Anomaly in Antarctica (ozone hole) are considered. On the basis of satellite ozone data and with the help of correlation-extreme algorithm the zonal velocities of ozone in the southern polar stratosphere are calculated. Results of calculations of the ozone hole area for the region where the total ozone was less than 220 Dobson units, and of the mass deficit of ozone in the stratosphere over Antarctica are presented. Close link of ozone mass deficit in the ozone hole with the zonal velocity of the region accumulation the total ozone in the circumpolar vortex for 1996 to 2009 is revealed in this article.*

*Keywords: ozone depletion, dynamic of the lower stratosphere.*

© Рублева Т. В., Кашкин В. Б., Мясников В. М., Селиверстов С. А., 2011