

Тренды общего содержания озона в 2005–2015 гг. по данным дистанционного зондирования

В.Б. Кашкин, А.А. Романов, Т.В. Рублева*

*Сибирский федеральный университет
660049, г. Красноярск, пр. Свободный, 79/10*

Поступила в редакцию 19.05.2016 г.

Обсуждается проблема оценки изменения общего содержания озона (ОСО) в атмосфере. Отмечается, что приводимые в литературе сведения о скорости изменения озонового слоя противоречивы. По данным ИСЗ Aura (сенсор OMI) найдены тренды и сезонные колебания ОСО для средних широт обоих полушарий за 2005–2015 гг. В работе вместо обычного метода наименьших квадратов использован сингулярный спектральный анализ. Найдено, что в Северном полушарии ОСО выросло на 1,97% в расчете на 10 лет, в Южном – на 1,52%. С августа по декабрь 2015 г. произошло аномальное уменьшение ОСО в Южном полушарии. Показано, что одной из причин могли стать особые циркуляционные условия, когда из тропических широт на север было перенесено большее количество озона, чем обычно, а на юг – меньшее.

Ключевые слова: стратосферный озон, метод сингулярного спектрального анализа, тренды общего содержания озона, дистанционное зондирование; stratospheric ozone, singular spectrum analysis, total ozone trends, remote sensing.

1. Проблема оценки тренда озона

За содержанием озона в атмосфере следит мировая сеть из около полутора тысяч наземных озонметрических станций, очень неравномерно распределенных по территории суши. Такая сеть практически не может регистрировать аномалии в глобальном распределении озона, даже если их линейный размер достигает тысячи километров.

Ежедневные цифровые карты глобального распределения общего содержания озона (ОСО) рассчитываются с 1978 г. с помощью оптической аппаратуры TOMS, OMI и аналогичной, установленной на искусственных спутниках Земли. Эти карты доступны, например, на сайте NASA [1]. Правда, в зимний период (в каждом из полушарий) Солнце не освещает полярные области, и спутниковая информация о состоянии озонового слоя в них недоступна. ОСО практически не изменяется в тропических широтах (от 25° ю.ш. до 25° с.ш.) [2]. Поэтому о глобальном изменении озона с течением времени целесообразнее судить по данным на средних широтах, например, в кольце от 37,5 до 57,5° или от 40 до 60° в каждом из полушарий.

Спектрофотометр OMI – это прибор, совместно разработанный учеными из Нидерландов и Финляндии и установленный на борту космического аппарата Aura (США). Он является одним из наиболее точных и стабильных озонных датчиков космического базирования. Авторы статьи [3] выпол-

нили сравнение показаний OMI и наземных данных об ОСО за период 2005–2015 гг. по сети из 76 наземных станций, использующих озонметры Добсона и Брюера. Установлено согласие в пределах 0,5%; информацию OMI рекомендовано применять для анализа трендов озона. Ранее результаты измерений озона по OMI были использованы нами в работе [4].

Анализ спутниковых и наземных данных, в принципе, позволяет найти тренды ОСО, по ним оценить скорость деградации или восстановления озонового слоя и предсказать дальнейшую его эволюцию. Проблема состоит в том, что эти тренды слабо выражены, их трудно выделить и оценить. Как отмечается в материалах 2006 г. Всемирной метеорологической организации (WMO) и Программы Организации Объединенных Наций по окружающей среде (UNEP), прогноз состояния озонового слоя остается неопределенным, существующие химические модели не позволяют точно воспроизводить наблюдаемые вариации ОСО, ожидается медленное увеличение глобального ОСО в ближайшие десятилетия [2].

Самые длинные ряды общего содержания озона (ОСО), начиная с середины 1920-х гг., получены озонметрической станцией Ароза (Швейцария). Как отмечается в [5], в Арозе тренд ОСО за 1926–1973 гг. составил +0,1% в год, а тренд за 1973–1993 гг. – –2,9%. В 1958–1970 гг. тенденция уменьшения суммарного озона не была устойчивой [6]. По данным наземных станций, в 1958–1961 гг. в Северном полушарии количество озона снижалось со скоростью $S = 4,7 \pm 1,5\%$ в расчете на 10 лет, а в Южном возрастало со скоростью $S = 2,5 \pm 2,3\%$.

* Валентин Борисович Кашкин (rtcvbk@rambler.ru); Алексей Андреевич Романов; Татьяна Васильевна Рублева.

В период с 1961 по 1970 гг. тренды ОСО поменяли знаки: в Северном полушарии ОСО увеличивалось со скоростью $S = 11,3 \pm 2,3\%$, а в Южном уменьшалось со скоростью $S = 2,1 \pm 1,6\%$ за 10 лет.

В 1970–1980 гг., судя по материалам WMO и UNEP [7], не было обнаружено статистически значимого снижения глобального содержания озона. С начала 80-х гг. по наземным и спутниковым данным в полярных и умеренных широтах Северного и Южного полушарий было выявлено значимое уменьшение ОСО [8]. В XXI в. зарегистрирован слабый рост ОСО.

В таблице приведены данные об изменении ОСО на средних широтах в расчете на 10 лет по спутниковым данным. В ряде использованных источников погрешность оценки не указана.

Авторы [9] указывают, что изменения глобального и регионального ОСО в период 1979–2014 гг. зависят от индекса солнечной активности, степени содержания в стратосфере озоноразрушающих веществ и вулканогенных аэрозольных частиц, среднезонального меридионального потока тепла в нижней стратосфере, квазидвухлетних колебаний зонального ветра в экваториальной стратосфере и от других факторов.

На рис. 1 приведен график изменения глобального общего содержания озона со второй половины XX в. по начало XXI в. по материалам WMO и UNEP [10]. В последние 15–20 лет наметилась тенденция к повышению ОСО, однако по этим данным трудно достоверно определить скорость восстановления озонового слоя. Указывается, что по спутниковым и наземным данным ОСО в интервале 60° ю.ш. – 60° с.ш. между 2000 и 2012 г. возросло на 1%.

Таким образом, с начала 80-х гг. до последней декады XX в. по наземным и спутниковым данным выявлено уменьшение содержания озона на глобальном уровне, к тому же зависящее от сезона и региона. К сожалению, нередко в работах отсутствуют описания предварительной обработки исходных временных рядов ОСО. В основном для расчета параметров трендов и их значимости применяется метод наименьших квадратов (МНК). Приводимые в литературе сведения о скорости изменения озонового слоя Земли достаточно противоречивы.

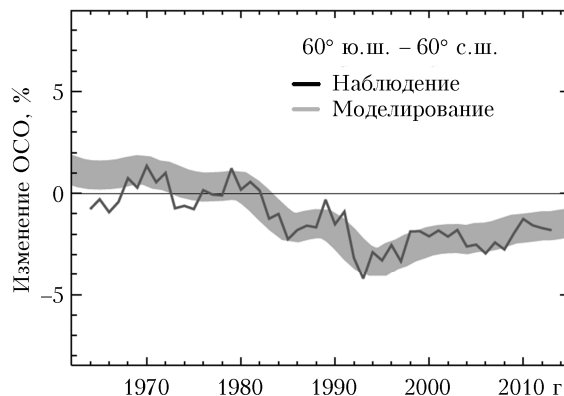


Рис. 1. Изменение ОСО (по материалам WMO и UNEP [10])

Несмотря на выявленную тенденцию уменьшения озонового слоя, а в настоящее время тенденцию его увеличения, характер и причины его изменения до сих пор остаются предметом научных дискуссий. Учет наблюдений последних лет изменяет оценки трендов ОСО в средних и высоких широтах Северного и Южного полушарий. Однозначного ответа о доминирующей роли антропогенного фактора дать не удалось.

2. Данные и методика обработки

Для анализа тенденции изменения общего содержания озона ранее нами использовались данные спутниковых измерений прибором TOMS в виде зональных средних с сайта NASA [1] за периоды 1978–1993 и 1996–2005 гг. [12, 13]. Эти результаты представлены в таблице. Зональные средние – это ежедневные величины ОСО, усредненные по долготе между $-179,5^\circ$ и $179,5^\circ$ в 5-градусном интервале широт, например между $52,5^\circ$ и $57,5^\circ$. Ниже выполнен анализ вариаций ОСО за 2005–2015 гг. по спутниковым данным OMI. Зональные средние за 2005–2014 гг. были взяты с сайта [1]. Зональные средние за 2015 г. вычислены нами по ежедневным глобальным данным ОСО [1]. На рис. 2 показаны графики временных рядов ОСО за 2005–2015 гг. для средних широт Северного и Южного полушарий.

Изменение количества озона в расчете на 10 лет по спутниковым данным

Период, годы	Северное полушарие	Южное полушарие	Ссылки
1979–1986	уменьшение на 3,4%	уменьшение на 3,4%	[11]
1979–1991	уменьшение на 4,0%	уменьшение на 4,0%	[12]
1978–1993	уменьшение на $3,4 \pm 0,36\%$	уменьшение на $4,8 \pm 0,36\%$	[12, 13]
1978–1993	уменьшение на 2,6%	уменьшение на 2,2%	[14]
1979–1994	уменьшение на 4–5%	уменьшение на 4–5%	[15]
1980–1992	уменьшение на $2,5 \pm 1,4\%$	уменьшение на $2,5 \pm 1,4\%$	[2]
1994–1997	уменьшение на 3,4%	уменьшение на 7,6%	[2]
1997–2000	уменьшение на 4%	уменьшение на 6%	[5]
1997–2000	уменьшение на 7%	уменьшение на 7%	[16]
1996–2003	уменьшение на 1,5%	уменьшение на 1%	[14]
1996–2005	увеличение на $2,9 \pm 0,36\%$	увеличение на $1,0 \pm 0,36\%$	[12]
2000–2012	увеличение на ~ 1%	увеличение на ~ 1%	[17]
2000–2013	увеличение на 2–5%	увеличение на 2–5%	[18]

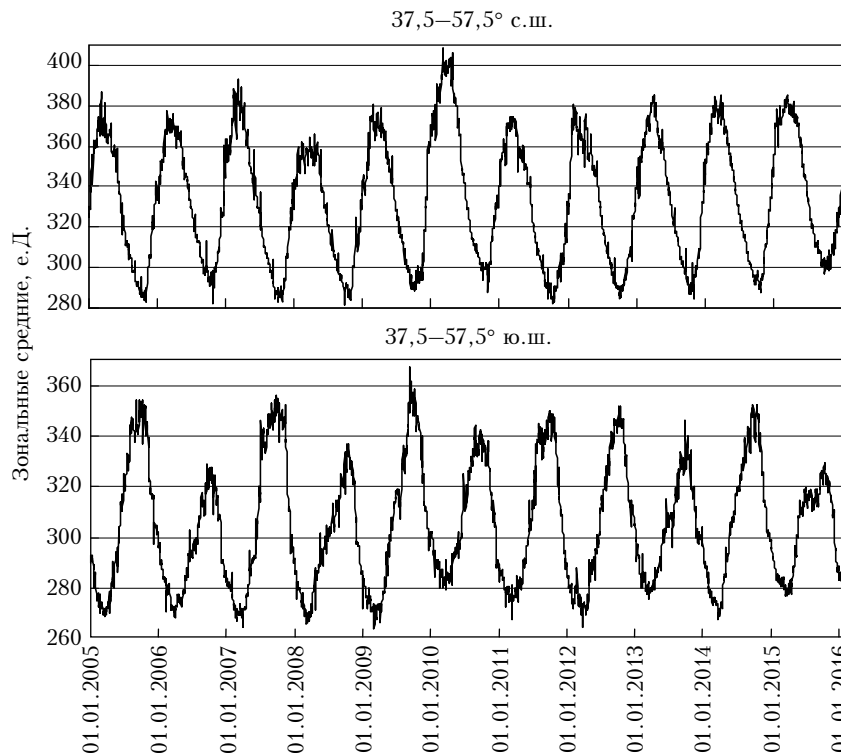


Рис. 2. Графики временных рядов среднего ОСО за 2005–2015 гг. в умеренных широтах

Обращает на себя внимание нетипичный вид участка графика ОСО для Южного полушария в период с августа по декабрь 2015 г. Это весна – время годового максимума ОСО в данном полушарии. В 2015 г. максимум оказался аномально низким, на 6% ниже средних значений максимумов ОСО за 2005–2014 гг. Возникла обширная озоновая дыра, которая быстро росла, и 2 октября 2015 г. имела площадь 28,2 млн км² (это четвертая по размерам озоновая дыра за 1991–2014 гг.) [19, 20]. Но озоновая дыра образовалась позже обычного и существовала до начала декабря. Минимальное общее содержание озона составило 101 е.Д., но в кольце, окружающем озоновую дыру на средних широтах, ОСО доходило до 350–400 е.Д.

Аномально низкий максимум ОСО наблюдался также весной 2006 г. Сравнение зональных средних значений ОСО в 2006 и 2015 гг. показало, что в 2015 г. минимум ОСО оказался на 8 е.Д. выше минимума 2006 г., так что размах годового колебания ОСО в 2006 г. превзошел размах колебания в 2015 г.

С точки зрения авторов [19, 20], в нижней стратосфере Антарктиды в весенний период 2015 г. присутствовали слабое движение воздуха и необычайно низкие температуры, способствовавшие разрушению озона при химических реакциях с активными соединениями хлора и брома, как полагают, антропогенного происхождения. Однако в работе [21] показано, что ключевым фактором в формировании антарктической озоновой дыры являются газы, выбрасываемые вулканом Эребус, расположенным в Антарктике.

При обработке временных рядов ОСО за 2005–2015 гг. использован метод сингулярного

спектрального анализа (ССА «Гусеница») [22], выделялись тренд и сезонный компонент. Метод основан на преобразовании временного ряда длиной n с равномерным шагом (x_1, x_2, \dots, x_n) в прямоугольную матрицу \mathbf{X} размером $n \times m$, где $m < n$. Первой строкой матрицы \mathbf{X} является отрезок ряда (x_1, x_2, \dots, x_m) , второй – отрезок $(x_2, x_3, \dots, x_{m+1})$, последней строкой – $(x_k, x_{k+1}, \dots, x_n)$. Формируется корреляционная матрица \mathbf{R} , соответствующая \mathbf{X} , вычисляются ее собственные числа и собственные векторы. Столбцы ортогональной матрицы собственных векторов \mathbf{P} играют роль переходных функций фильтров, настроенных на составляющие исходного процесса. ССА «Гусеница» позволяет выделить интересные компоненты временного ряда, в частности линейный и нелинейный тренды, компоненты с заранее известным и заранее неизвестным периодами, сгладить исходные данные, сделать прогноз ряда, заполнить пропуски. Ширина полосы пропускания фильтра обратно пропорциональна m – длине интервала усреднения (длине «гусеницы» m) и определяется видом собственного вектора. В нашем случае использована минимально возможная ширина полосы пропускания при $m = 2039$, здесь m составляет половину длины исследуемого временного ряда, равную 4079 отсчетов (дней).

Погрешность оценки скорости S изменения ОСО при использовании сингулярного спектрального анализа была исследована методом статистического моделирования [12]. Оказалось, что если $S = 4\%$ за 10 лет, то стандартное отклонение оценки S составляет $\sigma = 0,36\%$.

При нахождении тренда временных рядов обычно возникают артефакты, связанные с тем, что ряд

оборван в начале и в конце (краевые эффекты). Для устранения краевых эффектов использовалась методика, предложенная нами в [12, 13]: временной ряд ОСО прогнозировался на 600 дней «вперед» и «назад», артефакты также перемещались на 550–600 шагов вперед и назад, а начало и конец тренда оставались неискаженными.

Приведенные в таблице данные получены в основном с помощью МНК, кроме найденных нами в [12, 13]. Применительно к обработке временных рядов озона ССА «Гусеница» обладает значительными преимуществами перед МНК. Использование метода наименьших квадратов для временных рядов ОСО, показанных на рис. 2, строго говоря, некорректно, поскольку МНК предполагает, что данные, не относящиеся к тренду (обычно это ошибки измерений), некоррелированы [23]. Во временных рядах ОСО присутствуют интенсивные квазипериодические компоненты, значения которых не только коррелированы, но и связаны функционально. Можно попытаться удалить квазипериодические компоненты, однако предварительно требуется их выделить, что является достаточно сложной задачей.

3. Обсуждение результатов

Графики трендов ОСО за 2005–2015 гг. приведены на рис. 3. На рисунке показаны выделенные «Гусеницей» тренды и аппроксимирующие их прямые линии. В умеренных широтах Северного полушария с 1 января 2005 г. содержание озона

возросло, оценка скорости изменения ОСО составила $S = 1,97\%$ за 10 лет. Стандартное отклонение оценки S равно $\sigma = 0,16\%$. Аппроксимирующая прямая имеет вид $y = a_0 + a_1 \cdot n$, где n – порядковый номер суток, начиная с 01.01.2005 г. Здесь $a_0 = 330,46$ е.Д., $a_1 = 0,00160$ е.Д./сут. Аппроксимирующая прямая дает $S = 1,95\%$ за 10 лет. Линейная аппроксимация исходных данных (рис. 2) по МНК показывает заниженное значение оценки скорости изменения ОСО: $S = 0,68\%$ за 10 лет.

Для умеренных широт Южного полушария оценка скорости изменения ОСО $S = 1,52\%$ за 10 лет, с 1 января 2005 г. произошло увеличение содержания озона. Стандартное отклонение оценки S равно $\sigma = 0,12\%$. Аппроксимирующая прямая при $a_0 = 302,52$ е.Д. и $a_1 = 0,00111$ е.Д./сут дает значение $S = 1,48\%$ за 10 лет. Применяя МНК (линейную аппроксимацию) к исходным данным, удалось получить завышенное значение S , которое составляет $1,71\%$ за 10 лет. При исследовании тренда ОСО, приведенного на графике для Южного полушария (рис. 3), в конце 2015 г. было выявлено отклонение от прямой, обусловленное понижением общего содержания озона и уменьшением размаха сезонных колебаний в этот период.

На рис. 4. приведены графики сезонных компонентов рядов ОСО с 1 января 2005 г. по 1 января 2016 г. К ним отнесены колебания с периодом один год и половина года. На графике для Южного полушария в конце 2015 г. заметно уменьшение

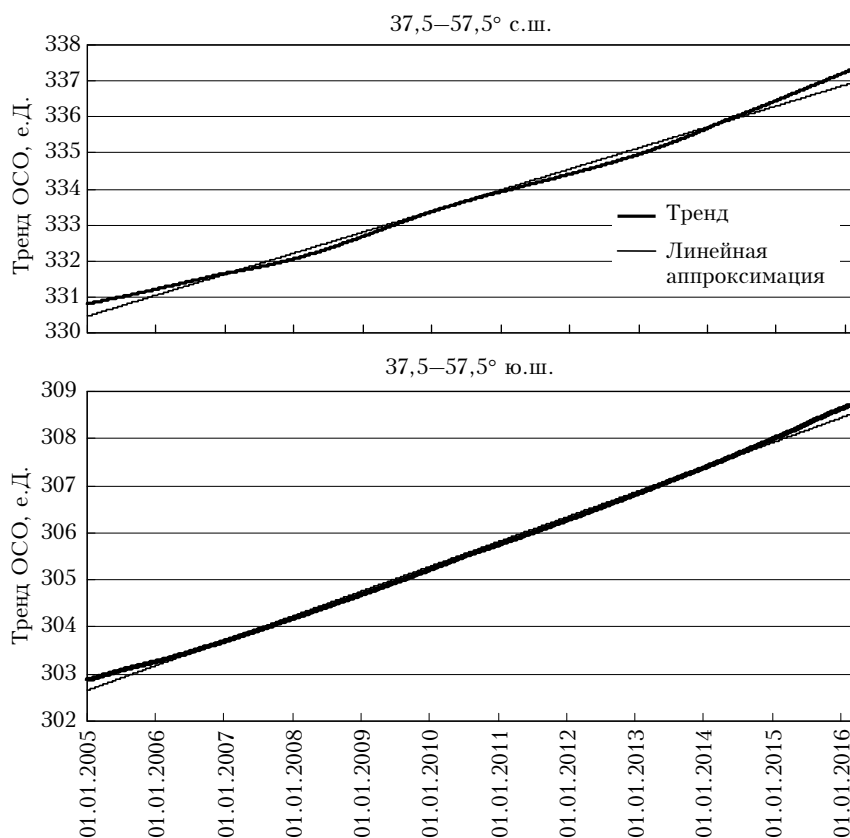


Рис. 3. Графики трендов ОСО за 2005–2015 гг.

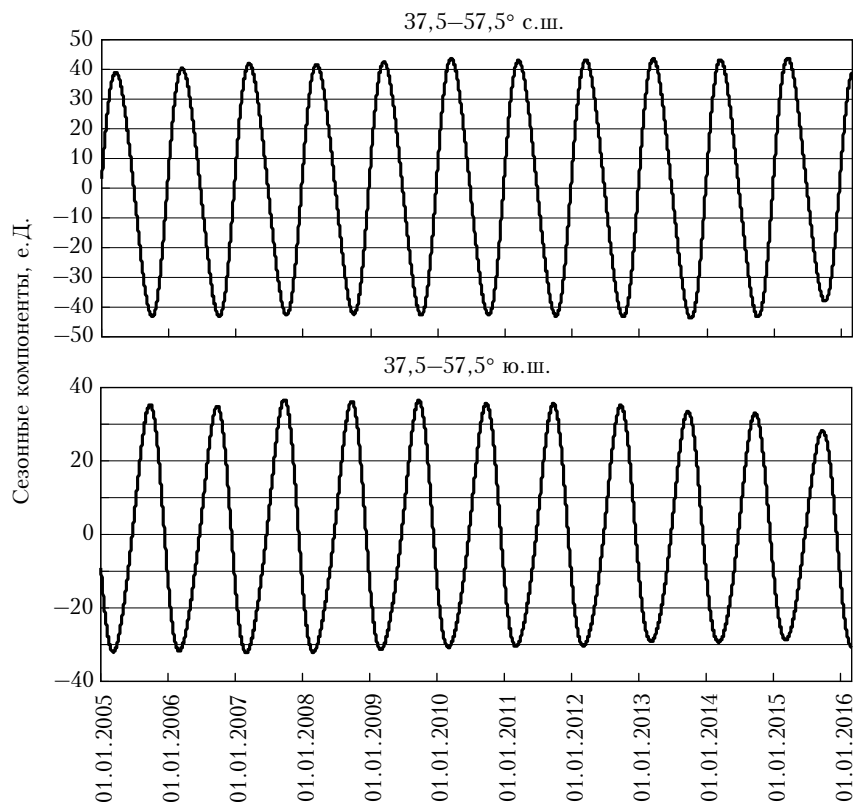


Рис. 4. Сезонные компоненты с 1 января 2005 г. по 1 января 2016 г.

амплитуды, вызванное атмосферными событиями августа–декабря. В этот же период в Северном полушарии амплитуда уменьшилась на 6%. Подобное изменение амплитуды можно видеть на рис. 2. На графике для Северного полушария заметно, что в 2015 г. минимум сезонного компонента оказался увеличенным по отношению к минимальным значениям ОСО в другие годы. По-видимому, в 2015 г. сложились такие циркуляционные условия, когда из тропических широт на север было перенесено большее количество озона, чем обычно, а на юг – меньшее. Это могло стать одной из причин понижения содержания озона в Южном полушарии и появления значительной по размерам озоновой дыры.

Анализ временного ряда сезонных компонентов с января 2005 г. по декабрь 2015 г. (рис. 4) показывает, что в средних широтах Северного полушария в 2005–2014 гг. произошло увеличение амплитуды сезонных колебаний на 4,3%. Если сравнивать значение амплитуды в 2015 г. с данными 2005 г., то они почти совпадают. В 2005–2014 гг. в Южном полушарии амплитуда сезонных колебаний уменьшилась на 6%, причем в 2015 г. произошло дополнительное уменьшение ее значения на 8%.

Исследованные тренды ОСО за 2005–2015 гг. относятся к периоду, когда активно действовал запрет на производство озоноразрушающих веществ. Как следует из анализа полученных оценок, в XXI в. намечилось увеличение глобальных значений ОСО. Получены уточненные оценки роста содержания озона в Северном и Южном полушариях. Однако

пока невозможно с определенностью утверждать, что увеличение ОСО связано только с результатами запрета.

1. Каталог ftp/pub/omi/data/ozone [Электронный ресурс]. URL: jwocjy.gsfc.nasa.gov (дата обращения 17.02.2016).
2. Executive summary WMO/UNEP «Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006. Ozone Research and Monitoring Project»: Report N 50. Geneva, 2007. 532 p.
3. McPeters R.D., Frith S., Labow G.J. OMI total column ozone: extending the long-term data record // Atmos. Measur. Techn. 2015. V. 8, iss. 11. P. 4845–4850. DOI: 10.5194/amt-8-4845-2015.
4. Кашкин В.Б., Рублева Т.В. Зональное движение масс озона в нижней стратосфере по спутниковым данным // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 9. С. 826–832.
5. WMO, Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1994. Global Ozone Research and Monitoring Project: Report N 37. Geneva: WMO, 1995. 575 p.
6. Монин А.С. Введение в теорию климата. Л.: Гидрометеоздат, 1982. 245 с.
7. WMO, Report of the International Ozone Trends Panel: 1988. Global Ozone Research and Monitoring Project: Report N 18. Geneva: WMO, 1989. V. 1. 478 p.
8. Вишератин К.Н. Межгодовые вариации и тренды среднезональных рядов общего содержания озона, температуры и зонального ветра // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2007. Т. 43, № 4. С. 67–85.
9. Звягинцев А.М., Варгин П.Н., Пешин С. Изменчивость и тренды общего содержания озона в период 1979–2014 гг. // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 9. С. 800–809; Zvyagintsev A.M., Vargin P.N., Peshin S. Total Ozone Variations and Trends during the

- Period 1979–2014 // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 6. P. 575–584.
10. WMO, Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014. Ozone Research and Monitoring Project: Report N 55. Geneva: WMO, 2015. 415 p.
 11. Кондратьев К.Я. Глобальная динамика озона // Итоги науки и техники. Сер. Геомагнетизм и высокие слои атмосферы. 1989. Т. 11. 209 с.
 12. 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.
 13. Кашкин В.Б., Рублева Т.В., Хлебопрос Р.Г. Стратосферный озон: вид с космической орбиты. Красноярск: Изд-во Сибир. фед. ун-та, 2015. 184 с.
 14. Звягинцев А.М., Крученицкий Г.М. Озоновый кризис: 20 лет спустя // Россия в окружающем мире: 2005: Аналитический ежегодник. М.: Модус-К–Этерна, 2006. С. 125–145.
 15. Рублева Т.В. Исследование изменчивости глобального поля озона на основе метода атмосферного трассера: дис. канд. техн. наук. Красноярск: Изд-во Сибир. фед. ун-та, 2012. 137 с.
 16. Vince G. Earth's ozone depletion is finally slowing [Электронный ресурс]. URL: <http://www.newscientist.com>. July 30, 2003 (дата обращения 14.08.2015).
 17. WMO, Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014. Ozone Research and Monitoring Project: Report N 55. Geneva: WMO, 2015. 415 p.
 18. Steinbrecht W., Stacey F.S., Lucien F.L., Harris N., Hassler B., Tummon F., Urban J., Weber M., Wild J. Ozone Profile Trends from the 2014 WMO/UNEP Ozone Assessment // *Geophys. Res. Abstr.* 2015. V. 17. EGU2015-3674-1. EGU General Assembly 2015.
 19. Annual Antarctic Ozone Hole Larger and Formed Later in 2015 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.nasa.gov/feature/goddard/annual-antarctic-ozone-hole-larger-and-formed-later-in-2015> (дата обращения 14.02.2016).
 20. The Ozone Hole 2015: NASA Report [Электронный ресурс]. URL: <http://www.theozonehole.com/2015.htm> (дата обращения 14.02.2016).
 21. Савельева Е.С., Зуев В.В., Зуева Н.Е. Вулкан Эребус – ключевой фактор усиления антарктической озоновой дыры // Химия в интересах устойчивого развития. 2014. Т. 22, № 5. С. 541–547.
 22. Голяндина Н.Э. Метод «Гусеница» SSA: анализ временных рядов: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПб. гос. ун-та, 2004. 74 с.
 23. Колмаев В.А., Староверов О.В., Турундаевский В.Б. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высш. шк., 1991. 399 с.

V.B. Kashkin, A.A. Romanov, T.V. Rubleva. Trends of total ozone content according to remote sensing data in 2005–2015.

The problem of total ozone change rate estimation is discussed. The analysis of published data reveals contradictory facts. This paper is based on OMI satellite total ozone data for 2005–2015. The singular spectrum analysis is used for estimation of the ozone trends and seasonal variations. The trend analysis shows that ozone increased with a rate of 1.97% per decade in the Northern hemisphere midlatitudes; and 1.52% per decade in the South hemisphere. There was an anomalous decrease in ozone in the Southern hemisphere from August to December of 2015; a large ozone hole was formed. It is shown that one of the caused could be the circulation conditions: from the tropical latitudes to the South less ozone than usually was moved.