

**ЗАВИСИМОСТЬ ПРИЗЕМНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ОЗОНА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И УСЛОВИЙ ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ В ЗАПАДНОЙ СИБИРИ В ТЕПЛЫЙ ПЕРИОД ГОДА (МАЙ–СЕНТЯБРЬ)**

**О.Ю. Антохина, Б.Д. Белан, Д.Е. Савкин, Г.Н. Толмачев**

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия  
densavkin88@rambler.ru

**DEPENDENCE OF SURFACE OZONE CONCENTRATION ON AIR TEMPERATURE AND ATMOSPHERIC CIRCULATION CONDITIONS IN WESTERN SIBERIA DURING THE WARM SEASON (MAY–SEPTEMBER)**

**O.Yu. Antokhina, B.D. Belan, D.E. Savkin, G.N. Tolmachev**

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia

**Аннотация.** Исследование проведено на основании данных измерений концентрации озона ( $O_3$ ) и температуры ( $T$ ) в приземном слое тропосферы TOR-станции за 1993–2016 гг., а также данных реанализа ERA-Interim о высоте геопотенциальной поверхности 500 гПа. В качестве характеристики циркуляции атмосферы использован критерий блокирования Тибалди и Молтени, направленный на отслеживание динамики градиента геопотенциала в умеренных широтах. Рассчитаны коэффициенты корреляции вариаций озона, приземной температуры и критерия блокирования. В работе показано, что коэффициент корреляции  $O_3$ - $T$  варьируется в очень широких пределах и зависит в частности от характера циркуляции атмосферы в исследуемом районе.

**Ключевые слова:** приземный озон, температура, циркуляция атмосферы, геопотенциал.

**Введение**

Исследование тропосферного озона в настоящее время представляет значительный интерес с точки зрения его влияния, не только на климат, но и на биосферу в целом. В стратосфере озон поглощает коротковолновое УФ-излучение, тем самым защищая биосферу Земли. В тропосфере озон негативно влияет на биологические объекты, растения, здоровье людей и является четвертым по значимости парниковым газом [Белан, 2010]. Данных о его изменчивости, особенно для территории Западной Сибири, крайне мало. Поэтому исследование приземной концентрации озона (ПКО) крайне актуально и не вызывает сомнения необходимость детального исследования механизмов его формирования в тропосфере, а также его пространственно-временной изменчивости.

Ранее, для рассматриваемого района (юг Западной Сибири), было продемонстрировано, что среднесуточная концентрация озона существенно зависит от величины температуры и солнечной радиации (коэффициенты корреляции 0.4 и 0.45 соответственно, для всего исследуемого ряда наблюдений) [Антохин и др., 2013]. Также была выявлена нелинейная функциональная зависимость образования озона от температуры воздуха в приземном слое. Причем, нелинейный рост начинается при температуре воздуха  $>10$  °C [Белан и др., 2016].

Приведенные исследования свидетельствуют в пользу того, что величина приземной температуры воздуха на юге Западной Сибири является важнейшим фактором, влияющим на образование озона, особенно в теплый период года. В представленной работе мы бы хотели более углубленно взглянуть на

связи «ПКО-температура» ( $O_3$ - $T$ ) для теплого периода (май–сентябрь). В частности, будут исследованы связи суточных вариаций внутри каждого выбранного месяца. Таким образом, мы продемонстрируем внутри сезонную неоднородность степени тесноты связи ПКО и температуры.

**Методы и данные измерений**

В данной работе для анализа использовались следующие данные:

- Среднесуточные данные ПКО и температуры воздуха ( $T_{\text{тор}}$ ) за 1993–2015 гг., рассчитанные по ежечасным значениям TOR-станции. Она расположена на юге Западной Сибири ( $56^{\circ}28'41''$  N,  $85^{\circ}03'15''$  E), где положительную часть баланса озона формируют фотохимические процессы его образования из газов-предшественников [Белан, 2010]. Станция функционирует с декабря 1993 г. по настоящее время. Более подробную информацию о данном poste мониторинга можно узнать в [Аршинов, 1994].

- Температура ( $T_{\text{аном}}$ ) из архива реанализа ECMWF ERA [Dee, 2011]. Для расчета корреляций рассчитывались аномалии температуры за каждый год с 1993 по 2015 относительно ее среднего значения с 1958 по 1990 (до 1979 Era-40, после 1979 — Era-Interim).

- Показатель обращения геопотенциала 500 гПа (GHGS — geopotential height gradient south) для 85 E (наиболее близкой долготы к району исследования). Он был разработан в [Tibaldi, Molteni, 1990] для обнаружения событий блокирования (далее в тексте обозначается либо GHGS, либо GS).

$$GHGS = \frac{Z(\varphi_0) - Z(\varphi_s)}{\varphi_0 - \varphi_s},$$

где  $Z$  — высота изобарической поверхности 500 гПа,  $\varphi_0=60^\circ N \pm \Delta$ ,  $\varphi_s=40^\circ N \pm \Delta$ ,  $\Delta=4^\circ$

Показатель GHGS может принимать положительные и отрицательные значения в зависимости от характера циркуляции. Приближение этого показателя к нулю на определенной долготе характеризует возникновение гребня. Если он принимает положительные значения, это означает, что формируется блокирующий антициклон. Напротив, при резко отрицательных значениях (которые могут достигать 30 дм) в атмосфере формируются глубокие ложбины.

### Результаты

На рис. 1. приведены графики межгодовой изменчивости величин коэффициентов корреляции для  $T_{\text{tor}}$ , GHGS и  $O_3$ , рассчитанные по их среднесуточным значениям отдельно для каждого исследуемого месяца.

На основании представленных на графиков (рис. 1) корреляции величин ( $T$ , GHGS и  $O_3$ ) можно отметить ряд особенностей. В каждом из сезонов есть отдельные ряды годы, для которых зависимость озона от температуры и величины GHGS очень высока и достигает величин 0.8, в иные же годы это связь снижается до нуля, а иногда становится отрицательной.

С точки зрения нашего исследования и выявленных связей GHGS- $O_3$  необходимо установить,

какие синоптические процессы соответствовали случаям в период с мая по сентябрь, для которых характерны превышения среднесуточных предельных концентраций озона (ПДК<sub>сс</sub>) озона в 3,4 раза. Вся выборка событий была разделена на события мая и первой декады июня (половина всех исследуемых случаев) и все остальные события (июль–сентябрь). Выделение майских событий в отдельную группу обусловлено рядом причин. Во-первых, в мае наибольшая повторяемость случаев высоких концентраций озона. Во-вторых, для мая характерна меньшая степень изменчивости коэффициентов связи, чем для приведенного в пример августа. В-третьих, для этого периода характерны наиболее высокие коэффициенты связи на межгодовых масштабах. Повторяемость таких концентраций составляет около 3 % [Аршинов и др., 2013]. Всего выбрано 31 случай из которых: 13 событий (41.9 %) приходится на май, 8 (25.8 %) — июнь, 6 (19.3 %) — июль, 2 (6.4 %) — август, 2 (6.4 %) — сентябрь.

Для примера, приведем графики изменчивости ПКО, аномалий температуры воздуха и градиента геопотенциала для случаев превышения ПДК<sub>сс</sub> для случаев мая-начала июня. Мы приводим именно эти графики потому, что они демонстрируют наилучшее соответствие для случаев превышения ПДК<sub>сс</sub>. Данные графики представлены на рис. 2.

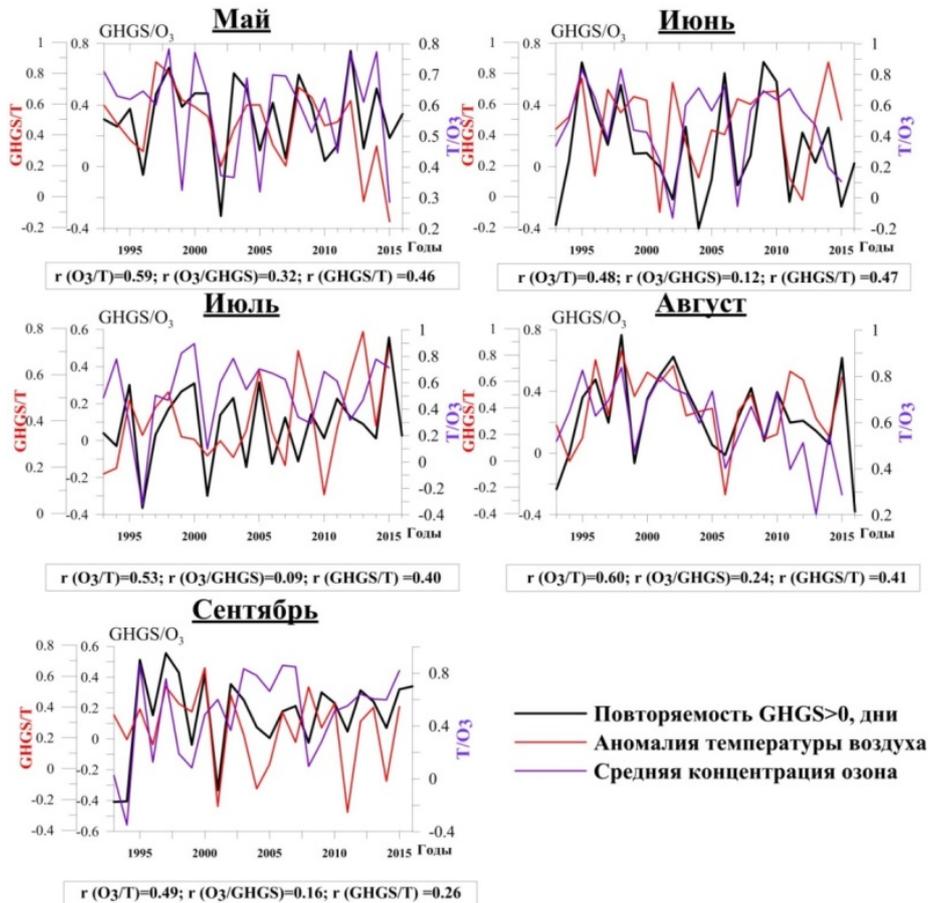


Рис. 1. Изменчивости коэффициентов корреляции величин ( $T$ , GHGS и  $O_3$ ), рассчитанных для среднесуточных значений каждого исследуемого месяца, а также их средние значения

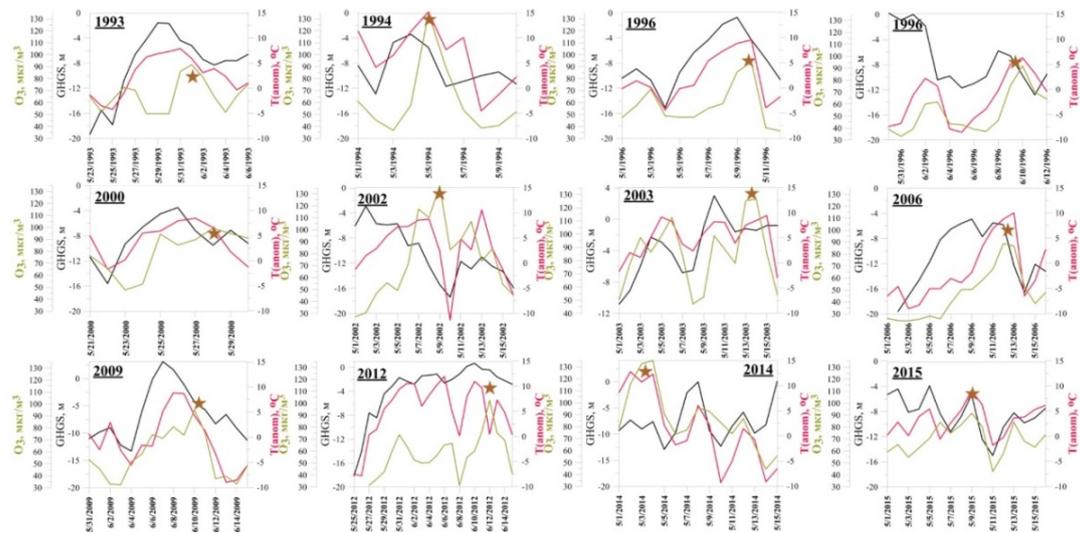


Рис. 2. Изменение концентрации озона ( $O_3$ ), аномалий температуры воздуха ( $T_{аном}$ ) и градиента геопотенциала (GHGS) для отдельных случаев мая – начала июня

В целом, для всех случаев превышения концентрации озона отчетливо видно либо синхронное увеличение температуры и геопотенциала, либо небольшое опережение увеличения этих характеристик относительно изменения концентрации озона. График градиента геопотенциала не всегда соответствует им столь же идеально, но это вполне закономерно.

При более детальном исследовании синоптических карт мы обнаружили, что рост ПКО и температуры воздуха в районе станции измерений для случаев 3 и более кратного превышения ПДК<sub>сс</sub> озона происходит синхронно смене воздушных масс. Особенно выражена динамика озона, в случае если в районе исследования последовательно сменялись арктическая (в периоды наблюдения которой концентрация озона была низкая) и субтропическая воздушные массы (высокое содержание озона) [Селегей и др, 2010]. Этот факт заставляет задуматься о том, что в периоды роста температуры воздуха («волна тепла») происходит не только изменение фотохимических реакций, но может происходить поступление озона и газов-предшественников с помощью адвекции. Поскольку в случаях формирования повышенных концентраций озона, однозначно присутствуют все условия: смена воздушных масс, рост температуры воздуха, увеличение прихода УФ-радиации при безоблачном небе в условиях антициклона. К сожалению, визуально показать динамику распределения PV-θ для отдельных случаев увеличения концентрации озона не представляется возможным, в виду ограниченности тезиса.

### Заключение

В представленной работе мы попытались ответить на ряд вопросов относительно связи циркуляции атмосферы, приземной температуры воздуха и ПКО в период с мая по сентябрь. В результате проведенного исследования можно сделать несколько выводов. Во-первых, степень зависимости  $O_3$ -T довольно высока. Более выраженными эти зависимости оказались для межсуточных вариаций, чем для межгодовых вариаций среднемесячных значе-

ний. Во-вторых, в мае-начале июня рост ПКО и  $T_{гор}$  для случаев 3 и более кратного превышения суточных ПДК<sub>сс</sub> озона часто происходит синхронно смене воздушных масс. В-третьих, на основе анализа градиента геопотенциала и соответствующего ему поведения потенциальной температуры на уровне динамической тропопаузы можно сделать вывод, что в целом GHGS неплохо отображает динамику смены воздушных масс. Исследование выполнено по гранту Российского научного фонда (проект № 17-17-01095).

### Список литературы

- Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Зуев В.В. и др. ТОР-станция мониторинга атмосферных параметров // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7, № 8. С. 1085–1092.
- Антохин П.Н., Белан Б.Д., Савкин Д.Е., Толмачев Г.Н. Сравнение различных методов статистического прогнозирования суточной динамики приземной концентрации озона // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26, № 12. С. 1082–1089.
- Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К. и др. Мезомасштабная изменчивость концентрации озона в приземном слое воздуха в Томском регионе (2010–2012 гг.) // Украинський гідрометеорологічний журнал. 2013. № 12. С. 95–105.
- Белан Б.Д. Озон в тропосфере. Томск: изд-во ИОА СО РАН. 2010. 488 с.
- Селегей Т.С., Филоненко Н.Н., Ленковская Т.Н. Зависимость концентраций приземного озона от адвективных факторов (на примере г. Новосибирска) // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23, № 12. С. 1080–1086.
- Belan B.D., Savkin D.E., Tolmachev G.N. A dependence of the ozone formation rate on the surface air temperature // Quadrennial Ozone Symposium 2016, UK, Edinburgh, 4–9 September 2016. [http://meetingorganizer.copernicus.org/QOS2016/poster\\_programme/22287P111:QOS2016-166](http://meetingorganizer.copernicus.org/QOS2016/poster_programme/22287P111:QOS2016-166).
- Dee D.P. et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2011. V. 137, N 656. P. 553–597.
- Tibaldi S., Molteni F. On the operational predictability of blocking // Tellus. 1990. V. 42A. P. 343–365.