

М.Ю. Аршинов, Б.Д. Белан, В.Е. Зуев, О.А. Краснов, В.А. Пирогов,  
Т.К. Складнева, Г.Н. Толмачев

## Многолетние вариации приземной концентрации озона как отражение солнечной активности

*Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*

Поступила в редакцию 10.07.2002 г.

Сопоставляются многолетний ход приземной концентрации озона (ПКО) и солнечной активности (радиоизлучение Солнца на  $\lambda = 10,7$  см). Выявлено, что ПКО повторяет ход солнечной активности с задержкой на 2–3 года. Анализ возможных причин такого сдвига привел к выводу, что он может быть обусловлен переходным процессом реакции растительности на изменение притока УФ-Б-радиации. Растительность, как известно, дает до 1/3 озонобразующих веществ. Поэтому проведено сравнение многолетнего хода ПКО и нормализованного индекса вегетации, что дало очень хорошее совпадение.

### Введение

Исследования тропосферного озона, проводившиеся интенсивно в последние десятилетия, существенно изменили представление о его роли в атмосферных процессах и воздействии на окружающую среду. Так, например, длительное время считалось, что озон в тропосфере является чуть ли не показателем чистоты воздуха. Современные результаты указывают на многочисленные неблагоприятные последствия роста его концентрации [1]. Озон в пограничном слое атмосферы относится к парниковым газам, уступая по вкладу (при нынешних концентрациях) лишь диоксиду углерода и метану. Рост приземной концентрации озона (ПКО) угнетающе действует на растительность, приводя к потере урожайности на 10–15% [2]. Он также способен окислять многие материалы, вплоть до платиновой группы [3]. Поэтому в последние десятилетия интенсивно проводится мониторинг ПКО во многих странах мира с целью определения тенденции ее изменения.

В Томске мониторинг ПКО начат авторами с сентября 1989 г. и ведется по настоящее время. Для измерений используется хемилюминесцентный озонметр (модель З-02П), изготовленный в ЗАО «ОПТЭК», который включен в состав ТОР-станции [4]. В настоящей статье рассматриваются многолетняя изменчивость приземной концентрации озона и возможные ее причины.

Ранее подобное исследование было выполнено нами для счетной концентрации аэрозоля и было показано, что в период с 1983 по 2000 г. она дважды уменьшалась в несколько раз [5]. Ход счетной концентрации повторял ход солнечной активности (числа Вольфа) с задержкой на 2 или 3 года в зависимости от номера 11-летнего цикла. Анализируя связь изменения концентрации аэрозоля с другими параметрами

в [6], мы показали, что в период, когда измерения озона и аэрозоля совпадали, их изменения были синхронны. Однако ввиду того, что во время подготовки статей [5, 6] ряд данных о ПКО не охватывал полного 11-летнего цикла солнечной активности, делать однозначный вывод об их взаимосвязи было некорректно. Последующие измерения позволили проверить и подтвердить этот предварительный вывод [5, 6]. Ниже анализируются возможные причины многолетней изменчивости приземной концентрации озона (рис. 1).

Из рис. 1 видно, что концентрация озона возросла с 1990 по 1993 г., когда у солнечной активности наблюдался двойной максимум. С 1991 г. радиоизлучение Солнца на  $\lambda = 10,7$  см, характеризующее солнечную активность, стало убывать. Уменьшение же ПКО происходило подобным образом, но на 2 года позже. Такой синхронный, со сдвигом, ход продолжался до 1995 г. Этот год оказался, по непонятным пока причинам, аномальным для ПКО.

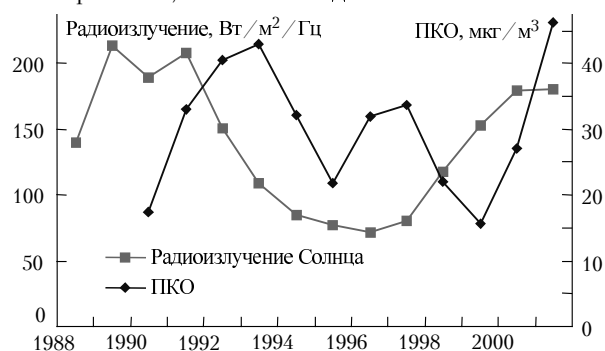


Рис. 1. Среднегодовая приземная концентрация озона в Томске и среднегодовая величина радиоизлучения всей поверхности Солнца на  $\lambda = 10,7$  см

Судя по рис. 1, произошел какой-то переходный процесс в атмосфере, в результате чего ход концентрации озона начал отставать от солнечной активности уже

на три года. И минимум его концентрации наступил в 1999 г., через 3 года после минимума солнечной активности, который наблюдался в 1996 г. С 1997 г. солнечная активность начала возрастать. ПКО же начала расти со сдвигом на 2–3 года с 2000-го. Таким образом, из рис. 1 следует, что приземная концентрация озона повторяет ход солнечной активности на протяжении всего 11-летнего цикла и демонстрирует ту же тенденцию в начале следующего.

## 1. Возможные причины изменения ПКО

На фоне увеличения глобальной концентрации озона [1, 2] приведенные для района Томска данные, на первый взгляд, кажутся противоречащими общей тенденции и вызывают несколько вопросов. Во-первых, не является ли такой ход ПКО отражением местных локальных процессов? Если нет, то каковы масштабы такого процесса?

Анализ результатов, опубликованных в последние годы [7–12], позволяет говорить о том, что этот процесс имеет крупномасштабный характер. Так, ход ПКО, близкий по характеру и по срокам, зафиксирован в [7] для Кисловодска, в [8] – для Греции, в [9] – для Финляндии, в [10] – для Дании. Правда, поскольку результаты [8–10] получены для регионов, отягощенных антропогенным воздействием, многолетняя амплитуда изменения концентрации озона там не столь велика, как на рис. 1 и в [7]. Кроме тренда ПКО, в [11, 12] для этого же периода (1990–2001 гг.) зафиксированы многолетние подобные вариации озонобразующих газов. В районе Мехико – NO<sub>x</sub> и CO, в Норвегии – NO<sub>x</sub>, этан, ацетилен, пропен. Следовательно, приведенные на рис. 1 данные имеют не случайный и не региональный характер. По-видимому, они отражают ход процессов, характерных, по крайней мере, для полушария. Первопричиной же таких процессов наиболее часто называют солнечную активность.

Рассматривая возможные прямые механизмы передачи сигнала от Солнца в тропосферу Земли, авторы работ [13, 14] выделяют три следующих. *Первый, конденсационный*, который заключается в том, что в период повышения интенсивности корпускулярного солнечного излучения космические лучи усиливают конденсационные процессы в верхней тропосфере, приводя к появлению дополнительных перистых облаков. Достоверного подтверждения этому процессу пока не получено. *Второй, озоновый*, определяется увеличением интенсивности жесткого УФ-излучения в период усиления солнечной активности. Это излучение поглощается в верхней стратосфере, приводя к образованию дополнительного количества молекул озона, а соответственно, к увеличению его общего содержания. Рост общего содержания озона, в свою очередь, вызовет дополнительное поглощение УФ-излучения с  $\lambda = 295\text{--}400$  нм, ответственного за образование озона в тропосфере. В работе [15] имеется подтвержде-

ние этому механизму. И наконец, *третий механизм* заключается в том, что изменяется спектральная светимость Солнца в УФ-области. Таким образом, из [13, 14] следует, что изменение ПКО может быть обусловлено многолетними вариациями прихода УФ-излучения Солнца к поверхности Земли.

## 2. Роль УФ-радиации в образовании тропосферного озона

В настоящее время имеются сведения как подтверждающие [16–18], так и отрицающие [19, 20] многолетние вариации прихода УФ-радиации. Чтобы проверить, что происходило с приходом УФ-радиации в районе измерений в рассматриваемый период, воспользуемся данными спутниковых измерений, представленными на сайте НАСА по адресу [21].

Рис. 2 показывает, что приход УФ-радиации к поверхности земли в районе Томска в многолетнем разрезе близок к ходу солнечной активности. Это говорит о том, что она напрямую не определяет образование озона в тропосфере.

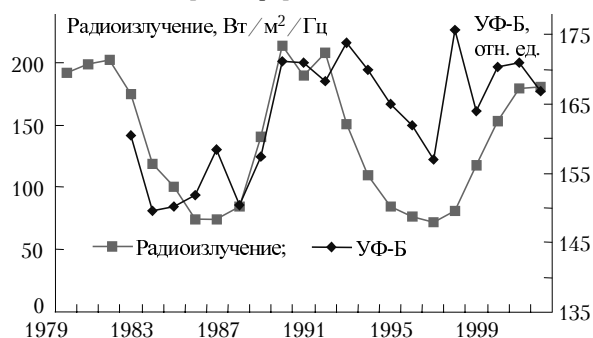
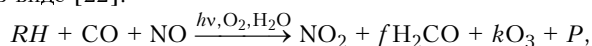


Рис. 2. Радиоизлучение поверхности Солнца на  $\lambda = 10,7$  см и среднегодовой приток солнечной УФ-Б-радиации

Периодичность же изменения УФ-радиации, близкая к 11-летнему циклу солнечной активности, не позволяет отрицать возможную ее связь с ПКО.

Из прямого сопоставления притока УФ-Б-радиации ( $\lambda = 295\text{--}320$  нм) и приземной концентрации озона видно (рис. 3,а), что они мало связаны между собой. Можно выделить отдельные периоды (1990–1995, 1997–1998), где они изменяются относительно синхронно. Ввиду того, что озон (см. рис. 1) и аэрозоль [5, 6] запаздывают относительно хода солнечной активности, на рис. 3,б и в кривые сдвинуты относительно друг друга на 2 и 3 года соответственно. Из рис. 3,в видно, что при сдвиге на 3 года изменение ПКО достаточно хорошо повторяет изменение притока УФ-Б-солнечной радиации. На наш взгляд, это говорит о том, что в многолетнем разрезе УФ-Б-радиация не напрямую способствует генерации тропосферного озона. По-видимому, это осуществляется через какой-то промежуточный механизм.

Чтобы попытаться найти этот механизм, запишем брутто-уравнение генерации озона в тропосфере в виде [22]:



где  $f$  и  $k$  – стехиометрические коэффициенты выхода формальдегида (альдегидов) и озона в процессе реакций;  $P$  – продукты реакций (аэрозольные частицы);  $RH$  – углеводороды различной природы;  $CO$  – оксид углерода;  $NO$  и  $NO_2$  – оксид и диоксид азота соответственно;  $h\nu$  – приток УФ-радиации;  $O_2$  – молекулы кислорода;  $H_2O$  – водяной пар.

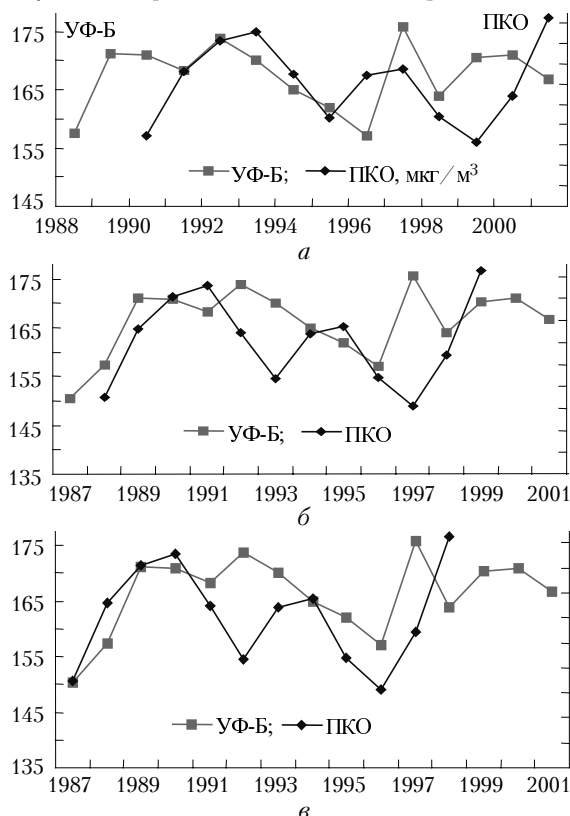


Рис. 3. Среднегодовая приземная концентрация озона и среднегодовой приток солнечной УФ-Б-радиации в районе г. Томска

Физический смысл этого брутто-уравнения заключается в том, что из первоначально поступающих в воздух углеводородов, оксидов углерода и азота под действием УФ-излучения Солнца, в присутствии кислорода и водяного пара, образуются диоксид азота, формальдегид (или другие альдегиды), озон и часть соединений переходят в аэрозольное состояние. Легко видеть, что прямой вклад в баланс озона будут вносить содержание озонобразующих веществ (левая часть уравнения) и приток солнечной УФ-радиации, косвенный вклад – водяной пар, который обеспечивает образование гидроксильных групп в циклах генерации озона.

Роль УФ-солнечной радиации легко увидеть из рис. 4, построенного по данным, опубликованным в [23]. Из рис. 4,а следует, что все временные вариации ПКО зависят от прихода УФ-радиации. Амплитуда же изменений не всегда пропорциональна приросту или падению интенсивности УФ-радиации. Это говорит о том, что временную изменчивость ПКО определяет УФ-радиация, а величину изменчивости – первоисточники озона или состав воздуха. Такая же тенденция видна и в среднемесячных величинах (рис. 4,б).

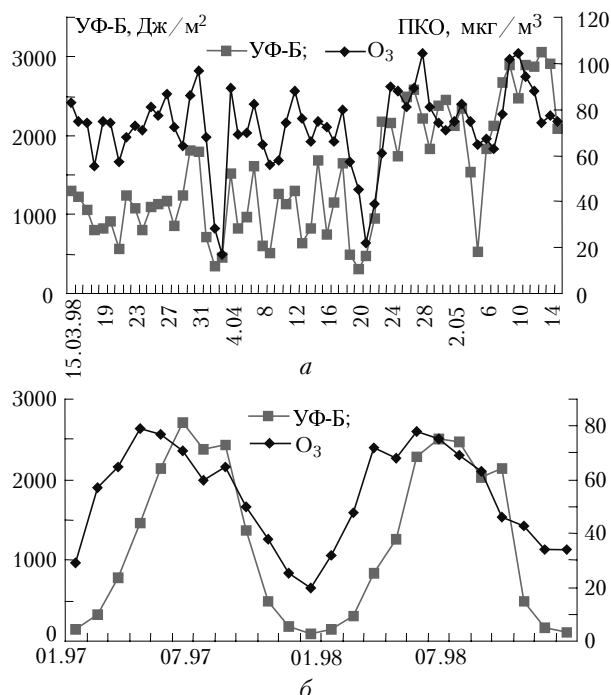


Рис. 4. Интенсивность УФ-радиации и приземная концентрация озона в Бельске (Польша): а – среднесуточные значения 15 марта – 15 мая 1998 г.; б – среднемесячные значения 1997–1998 гг.

Следовательно, причину долговременного изменения ПКО, показанную на рис. 1, нужно искать в изменении состава воздуха, точнее озонобразующих компонент, входящих в левую часть брутто-уравнения.

### 3. Роль состава воздуха в образовании озона

Для однозначного ответа на вопрос о роли состава воздуха в образовании озона помимо УФ-радиации и озона необходимо контролировать оксиды углерода и азота, метан и большое количество органических газов. С учетом того что значительная часть органических газов определяется с помощью газовой хроматографии или хромато-масс-спектрометрии, организовать оперативный мониторинг всех компонентов озонного цикла теоретически возможно, хотя практически почти не реализуемо. Поэтому оценку вклада отдельных компонентов проведем по методу исключений.

В наших измерениях оперативно контролировались два из перечисленных компонентов, а именно оксид азота  $NO$  и оксид углерода [4], эпизодически – метан. Из образующих соединений оперативно контролировались  $NO_2$  и  $O_3$ . Сопоставление полученных значений с концентрацией озона показало, что между ними нет устойчивой связи. Более того, в ходе  $NO$ ,  $NO_2$  и  $CO$  не обнаруживается каких-либо устойчивых долговременных изменений. Результаты наших измерений подтверждаются и данными глобальной сети, опубликованными в [24]. Поэтому есть основание полагать, что изменение баланса первичных озонобразующих веществ, обеспечивших столь значительный

тренд концентрации озона в Томске, происходило за счет углеводородов, которые в наших экспериментах не контролировались.

Основными источниками углеводородов являются почва, поставляющая в воздух метан, и растительность, эмитирующая все остальные органические газы [25]. Данные измерений на глобальной сети показывают [24], что концентрация метана в интересующий нас период повсеместно возрастала.

Данные [12] показывают, что у некоторых углеводородов, имеющих растительное происхождение, в рассматриваемый период (1990–1999 гг.) имелся тренд, аналогичный обнаруженному нами для озона. Последнее позволяет предположить, что растительность в период уменьшения концентрации озона выделяла меньше озонобразующих газов.

Обстоятельное исследование эмиссии органических газов растительностью было выполнено В.А. Исидоровым в [26]. Были определены состав выделений для большого количества видов растений, скорость и объем эмиссии, зависимость скорости эмиссии от температуры воздуха. Выявленные факторы говорят о том, что эмиссия органики может изменяться под действием внешних возмущений. Такими возмущениями, помимо климатических факторов, может выступать УФ-радиация Солнца [27, 28].

Поскольку длительных измерений  $RH$  у нас не имеется, так же как и в других регионах, кроме описанных в [12], возникает вопрос о том, как проверить, изменялась ли эмиссия органических соединений растительностью в период с 1990 по 2001 г. в районе измерений?

В настоящее время для комплексной характеристики состояния растительности используется так называемый нормализованный вегетационный индекс (NDVI). Для определения его величины используются 1-й и 2-й каналы радиометра AVHRR спутников серии НОАА. Первый канал (0,58–0,68 мкм) дает информацию о поглощении солнечной радиации хлорофиллом растений. Второй канал принимает отраженную радиацию в диапазоне 0,78–0,90 мкм. Затем индекс вычисляется по формуле

$$NDVI = \frac{J_{\lambda_1} - J_{\lambda_2}}{J_{\lambda_1} + J_{\lambda_2}},$$

где  $J_{\lambda_1}$  и  $J_{\lambda_2}$  – сигналы в 1-м и 2-м каналах радиометра соответственно. Данные о NDVI выставлены в Интернете по адресу [29].

По данным [30], NDVI очень сильно коррелирован с вегетационными параметрами, такими как объем биомассы и площадь зеленой поверхности. Е.А. Шишкин отмечает [31], что величина NDVI зависит от роста и развития листовой поверхности деревьев и хорошо отражает их динамику. Вместе с тем он делает следующий вывод: поскольку реальная величина фотосинтеза и продуктивности зависит не только от солнечной энергии, но и от других факторов, то реальный фотосинтез всегда будет ниже, чем измеряемый по NDVI. Исследования сотрудииков ВНИИСХМ

показали, что в 90% случаев различия в результатах между NDVI и наземными наблюдениями составляли 10% [32]. Следовательно, можно допустить, что NDVI, отражая состояние растительности, тем самым будет косвенно отражать и эмиссию его органических газов в атмосферу.

На рис. 5 сопоставлены среднегодовые значения индекса вегетации, рассчитанные для района г. Томска по квадрату 55–57° с. ш. и 85–87° в. д., и среднегодовая приземная концентрация озона, измеренная на ТОР-станции. Видно, что с небольшими отклонениями ход ПККО повторяет ход NDVI. На наш взгляд, это указывает на то, что в зависимости от интенсивности вегетации растений изменяется и количество углеводородов, поступающих от них в атмосферу, а равно и количество образующегося в воздухе озона.

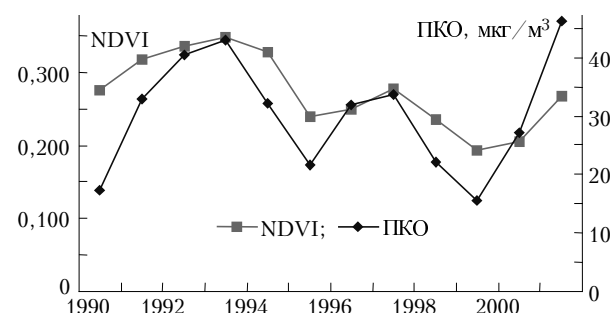


Рис. 5. Среднегодовые значения NDVI и ПККО для района г. Томска

Рис. 6 демонстрирует, что эта связь существует не только в многолетнем ходе. Она хорошо выполняется и в сезонном ходе в отдельные годы. В частности, из рис. 6 видно, что периодически появляющийся

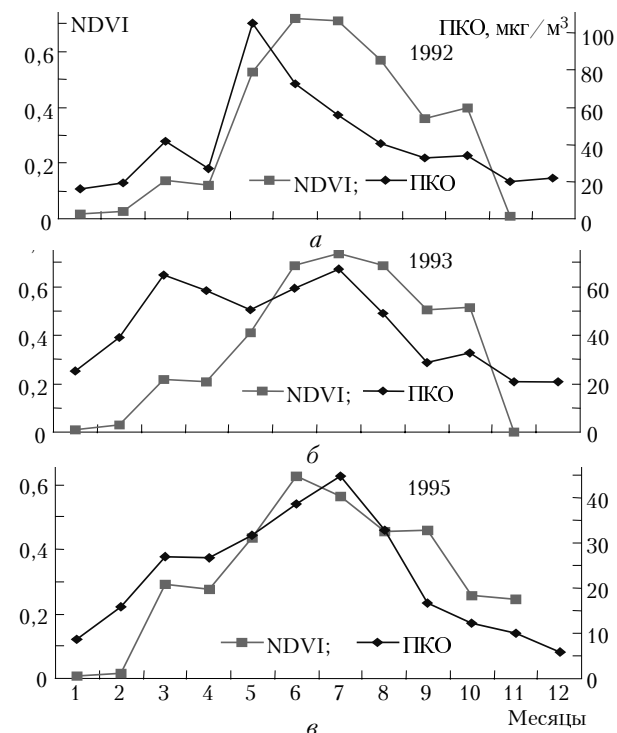


Рис. 6. Среднемесячные значения NDVI и ПККО в 1992, 1993 и 1995 гг.

вторичный весенний максимум ПКО обусловлен ранним всплеском вегетационной активности растений.

#### 4. Обсуждение результатов

Остановимся еще на одном моменте. Поскольку NDVI и ПКО хорошо коррелируют во времени, то это значит, что NDVI также сдвинут в многолетнем ходе по отношению к изменению УФ-радиации, которое приведено на рис. 2. Возможны два объяснения этого процесса.

Первое заключается в том, что УФ-радиация, являясь первопричиной интенсификации фотохимических процессов, при ее усилении способствует генерации дополнительного количества озона. Озон же начинает угнетающе действовать на растительность [2], ослабляя ее вегетационную активность.

Второе, менее изученный процесс, что это, возможно, неоднозначная реакция растительности на усиление УФ-радиации. Реакция растений на изменение УФ-облученности рассматривается в целом ряде работ [33–37]. Основные их результаты можно сформулировать следующим образом.

Коротковолновой границей спектра для фотосинтеза зеленых растений можно считать излучение  $\lambda \geq 330$  нм. Более коротковолновая  $\lambda \leq 330$  нм УФ-радиация резко подавляет фотосинтез. А именно в этой области происходят изменения интенсивности при вариациях солнечной активности. Характер действия на растения УФ-радиации области Б ( $\lambda = 295\text{--}320$  нм) зависит от дозы: при малых (для данного растения) дозах происходит стимуляция их жизнедеятельности, при больших дозах – угнетение. Кроме того, УФ-Б-излучение интенсивно поглощается белком, хлорофиллом и другими веществами, поэтому ее усиление сказывается на жизнедеятельности растений.

Возвращаясь к рис. 5 и 6, с определенной долей уверенности можно заключить, что в природе скорее всего реализуется второй механизм. В противном случае ход ПКО опережал бы изменения NDVI.

Реализуется он следующим образом. Нарастание притока УФ-радиации при усилении солнечной активности в основном диапазоне  $\lambda \leq 320$  нм действует на растения угнетающе. Необходим адаптационный период в 2–3 года, чтобы растения приспособились к новому УФ-облучению. Здесь уместно привести результаты [38], где показано, что биота Земли действует по известному принципу Ле Шателье: при возникновении внешних возмущений, нарушающих состояние окружающей среды, в биосфере происходят процессы, компенсирующие эти возмущения. Приспособившись к повышенному фону, растения начинают эмитировать дополнительное количество легколетучих органических соединений. При сохранившемся высоком фоновом значении УФ-радиации это, судя по брутто-уравнению, должно обеспечить максимум генерации озона в тропосфере.

В пользу именно такого механизма свидетельствуют и результаты работ [39–41], в которых обнаружен так называемый «долговременный кумулятивный

эффект УФ-Б» в жизнедеятельности растений. Авторами этих работ показано, что при длительном облучении растений дополнительной УФ-Б-радиацией (4 года) восстановление фотосинтеза наступает только через 3 года.

Можно принять во внимание, что помимо УФ-радиации выделение легколетучих органических соединений растениями будет зависеть и от других факторов (температура и влажность воздуха, состояние почвы). Однако уместно напомнить, что ряд этих факторов также положительно коррелирован с солнечной активностью [42–44]. Более того, еще А.Л. Чижевский в [45] обнаружил для самых разных регионов запаздывание наступления максимума температуры воздуха на 2–3 года после максимума солнечной активности.

#### Заключение

В результате мониторинга приземной концентрации озона обнаружен многолетний (близкий к 11-летнему) переменный ход, который запаздывает по отношению к солнечной активности на 2–3 года. Анализ возможных причин запаздывания привел к выводу, что он обусловлен «долговременным кумулятивным эффектом УФ-Б-радиации» на растения, в результате чего снижается фотосинтез и в атмосферу поступает меньше органических газов, из которых образуется озон.

В настоящей статье не рассматривались значимые для озоносферы динамические процессы, которые по амплитуде несколько меньше, чем воздействие солнечной активности. Исследованию их взаимосвязи будет посвящена следующая публикация.

1. Марчук Г.И., Кондратьев К.Я., Алоян А.Е., Вароцос К.А. Изменение общего содержания стратосферного и тропосферного озона: наблюдения и численное моделирование // Исслед. Земли из космоса. 1999. № 5. С. 12–30.
2. Семенов С.М., Кунина И.М., Кухта Б.А. Тропосферный озон и рост растений в Европе. М.: Метеорология и гидрология. 1999. 208 с.
3. Перов С.П., Хргиан А.Х. Современные проблемы атмосферного озона. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 288 с.
4. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Ковалевский В.К., Плотников А.П., Покровский Е.В., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н. Автоматический пост для мониторинга малых газовых составляющих атмосферного воздуха // Метеорол. и гидрол. 1999. № 3. С. 110–118.
5. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Зуев В.Е. и др. Связь концентрации тропосферного аэрозоля над Западной Сибирью с солнечной активностью // Докл. РАН. 2000. Т. 373. № 2. С. 238–241.
6. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Ковалевский В.К., Плотников А.П., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н. Многолетняя изменчивость тропосферного аэрозоля над Западной Сибирью // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13. № 6–7. С. 627–630.
7. Elansky N.F., Arabov A.Ya., Senik I.A. et al. The Features of Surface Ozone Variations in Remote Rural and Urban Regions of Russia // EUROTRAC: TOR-2 Annual Report-2000. Munich: GSF, 2001. P. 72–75.
8. Butkovic T., Cvitas T., Dzepina K. et al. Boundary Layer Ozone Measurements in Croatia // Ibid. P. 89–92.

9. Laurila T., Hacola H., Lindfors V., Tuovikien J.-P. Trends of Ozone and Photochemical Precursors in Finland // *Ibid.* P. 93–97.
10. Skov H., Egelov A.H., Kemp K. et al. Ozone, PAN, NO and Peroxy Radical Concentrations at Liele Velby, Denmark // *Ibid.* P. 127–130.
11. Molina L.T., Molina M.J. Air Pollution in Megacities: Mexico City Case Study // *EUROTRAC Newsletter*. 2001. N 23. P. 4–9.
12. Roster M. In search for trends ozone and precursors // TNO report R 2001/100. Apeldoorn, 2001. 55 p.
13. Кондратьев К.Я., Никольский Г.А. Солнечная активность и климат. 1. Данные наблюдений. Конденсационная и озонная гипотезы // *Исслед. Земли из космоса*. 1995. № 6. С. 3–17.
14. Кондратьев К.Я., Никольский Г.А. Солнечная активность и климат. 2. Прямое воздействие изменений внеатмосферного спектрального распределения солнечной радиации // *Исслед. Земли из космоса*. 1995. № 6. С. 3–17.
15. Белан Б.Д., Зуев В.В., Скляднева Т.К., Смирнов С.В., Толмачев Г.Н. О роли суммарного озона в фотохимическом образовании его тропосферной части // *Оптика атмосфер. и океана*. 2000. Т. 13. № 10. С. 928–932.
16. Feister U., Grewe R. Higher UV radiation inferred from low ozone levels at northern mid-latitudes in 1992 and 1993 // *Glob. and Planet. Change*. 1995. V. 11. N 1. P. 25–34.
17. Frederick J.E., Qu Zheng, Booth C.R. Ultraviolet radiation at sites on the Antarctic coast // *Photochem. and Photobiol.* 1998. V. 68. N 2. P. 183–190.
18. Zerefos C., Meleti C., Balis D. Quasi-biennial and longer-term changes in clear sky UV-B solar irradiance // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. N 23. P. 4345–4348.
19. Michaels P.J., Singer S.F., Knapperberger O.P.E. et al. Analysing ultraviolet-B radiation: is there a trend // *Science*. 1994. V. 264. P. 1527–1547.
20. Me Kenzie R.L. Determining variabilities and trends in UV radiation // *WMO. World Clim. Res. Programme*. 1997. V. 2. N 814. P. 517–520.
21. ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/eptoms/data/monthly\_averages/uv/
22. Белан Б.Д. Проблема тропосферного озона и некоторые результаты его измерений // *Оптика атмосфер. и океана*. 1996. Т. 9. № 9. С. 1184–1213.
23. Borkowski J. (Editor). Atmospheric ozone solar radiation 1997–1998. Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sci. 1999. D-50. 128 p.
24. WMO WDGG Data Summary. Greenhouse Gases and Other Atmosph. Gases. Publish. by Japan Meteorol. Agency. 2002. N 26. 92 p.
25. Исидоров В.А. Органическая химия атмосферы. СПб.: Химиздат, 2001. 352 с.
26. Исидоров В.А. Летучие выделения растений: состав, скорость эмиссии и экологическая роль. СПб.: Алга, 1994. 188 с.
27. Owen Susan M., Boissard C., Hagenlocher B., Nidalas Hewitt C. Field studies of isoprene emissions from vegetation the Northwest Mediterranean region // *J. Geophys. Res. D*. 1998. V. 103. N 19. P. 25499–25511.
28. Janson R., De Serves C. Isoprene emissions from boreal wetlands in Scandinavia // *J. Geophys. Res. D*. 1998. V. 103. N 19. P. 25513–25517.
29. http://www.saa.noaa.gov/swwig-lin/wwwdisplay
30. Justice C.O., Townshend J.R.G., Holben B.N., Tucker C.J. Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data // *Int. J. Remote Sens.* 1985. N 6. P. 1271–1318.
31. Шишкин Е.А. Системный анализ пространственно-временной динамики показателей первичной продуктивности древесных растений в Сибири: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Красноярск: ИЛ СО РАН, 2002. 21 с.
32. В центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам // *Метеорол. и гидрол.* 2002. № 5. С. 125–127.
33. Белинский В.А., Гараджа М.П., Меженная Л.М., Невзаль Е.И. Ультрафиолетовая радиация солнца и неба. М.: МГУ, 1968. 228 с.
34. Русин Н.П. Прикладная актинометрия. Л.: Гидрометеониздат, 1979. 232 с.
35. Шульгин И.А. Солнечная радиация и растения. Л.: Гидрометеониздат, 1967. 180 с.
36. Добровольский Г.В. Основы биогеохимии. М.: Высшая школа, 1998. 413 с.
37. Орт Д., Меландри Б.А., Юнге В и др. Фотосинтез. Т. 7. М.: Мир, 1987. 460 с.
38. Гориков В.Г., Кондратьев К.Я. Принцип Ле Шателье в приложении к биосфере // *Экология*. 1990. № 1. С. 7–16.
39. Sullivan J.H., Teramura A.H. Field study of the interaction between solar ultraviolet-B radiation and drought on photosynthesis and growth in soybean // *Plant Physiol.* 1990. V. 92. N 2. P. 141–146.
40. Sullivan J.H., Teramura A.H. The effects of ultraviolet-B radiation on loblolly pine. 2. Growth of field-grown seedling // *Trees*. 1992. V. 6. N 1. P. 115–120.
41. Teramura A.H., Sullivan J.H. Effects of UV-B radiation on photosynthesis and growth of terrestrial plants // *Photosynthesis Research*. 1994. V. 39. N 3. P. 463–473.
42. Фахрутдинова А.Н., Перевезенцев Ю.П., Коротышкин Д.В. Долговременные вариации солнечной активности и температурного режима приземного слоя воздуха в Казани // *Материалы научной конференции, посвященной 10-летию образования МСГ*. СПб.: Гидрометеониздат, 2002. Секция 3. С. 53–55.
43. Tomasino M., Dalla Valle F. Natural climatic changes and solar cycles: an analysis of hydrological time series // *Hydrol. Sci. J. – des Sci. Hydrol.* 2000. V. 45. N 6. P. 477–490.
44. Владимирский Б.М., Темурьянц Н.А. Влияние солнечной активности на биосферу–ноосферу. М.: МНЭПУ, 2000. 374 с.
45. Чижевский А.Л. Земное эхо солнечных бурь. М.: Мысль, 1976. 367 с.

M.Yu. Arshinov, B.D. Belan, V.E. Zuev, O.A. Krasnov, V.A. Pirogov, T.K. Sklyadneva, G.N. Tolmachev.  
**Long-term variations of near-surface ozone concentration as a reflection of the solar activity.**

The long-term behavior of the near-surface ozone concentration was compared with of the solar activity (solar radio radiation at  $\lambda = 10.7$  cm). It was found that the ozone concentration copies the behavior of the solar activity with a delay of 2–3 years. Analysis of possible causes for such a delay led to the conclusion that it can be caused by the transient process of plant response to the change in UV B radiation influx. As is well-known, plants produce up to 1/3 of ozone-generating substances. Therefore, the long-term behavior of the ozone concentration was compared with that of the normalized vegetation index, and a very close agreement was obtained.