

## Прогноз изменения концентрации озона и аэрозоля на основании предсказанного в 24-м цикле уровня солнечной активности

П.Н. Антохин, М.Ю. Аршинов, Б.Д. Белан, Т.К. Складнева, Г.Н. Толмачев\*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 16.03.2012 г.

На основании установленной эмпирической зависимости между изменением концентрации озона и аэрозоля в приземном слое воздуха в районе Томска и ходом солнечной активности в 21-м–23-м одиннадцатилетних циклах (радиоизлучение на длине волны 10,7 см), по литературным данным о прогнозе солнечной активности на 24-й одиннадцатилетний цикл, дан прогноз изменения среднегодовых концентраций озона и аэрозоля до 2021 г. Продолжающиеся измерения озона и аэрозоля и осуществляющийся мониторинг солнечной активности позволят в дальнейшем проверить оправдываемость прогноза.

*Ключевые слова:* атмосфера, аэрозоль, озон, прогноз, многолетний, солнечная активность; atmosphere, aerosol, ozone, forecast, long-term, solar activity.

### Введение

Возможные глобальные изменения окружающей среды и климата приводят к необходимости создания методов прогноза многолетнего изменения состава атмосферы как ключевого звена в радиационном балансе Земли. В этом плане описанные еще А.Л. Чижевским [1] солнечно-земные связи открывают самые широкие возможности для многолетнего прогнозирования. При этом в большинстве случаев в тропосфере до сих пор физический механизм действия солнечно-земных связей непонятен [2].

По данным мониторинга состава воздуха на ТОР-станции [3] нами была зафиксирована многолетняя изменчивость концентрации озона и аэрозоля в приземном слое воздуха, близкая к 11-летней [4]. Кроме того, предложен возможный механизм изменения их концентрации в зависимости от солнечной активности и сделан прогноз изменения среднегодовых концентраций озона и аэрозоля в 23-м ее цикле на основании прогноза, опубликованного в [5, 6].

Продолжавшийся мониторинг на ТОР-станции позволил сопоставить данные прогноза с фактически наблюдаемыми. Оказалось [7], что на значительном участке 23-го цикла, по критериям «аналогичности» и «аномальности» [8], хорошо оправдался прогноз среднегодовой концентрации аэрозоля и значительно хуже для озона. Так, критерий аналогичности для аэрозоля составляет 0,87 (при максимальном

значении 1,00), для озона 0,58, что даже меньше величины, принимаемой для инерционного прогноза (0,67). В конце цикла (2007–2009 гг.) прогноз и фактические данные не совпали даже по фазе. Возможно, сказались необычайно затянувшийся минимум солнечной активности в 23-м цикле [9–11] или сложение минимумов нескольких циклов, на что указывалось в [12].

Цель настоящей работы — дать прогноз изменения среднегодовых концентраций озона и аэрозоля в 24-м цикле солнечной активности.

### Исходные данные

Для анализа и прогноза концентрации озона и аэрозоля в приземном слое воздуха используются данные ТОР-станции, которая расположена в Академгородке, находящемся в 10 км от г. Томска. Для измерения озона применяются хемилюменесцентный анализатор З-02П разработки и изготовления ЗАО «ОПТЭК» (г. Санкт-Петербург) и периодически ультрафиолетовый газоанализатор, модель 49С производства фирмы Thermo Environmental Instruments (США). Для контроля счетной концентрации аэрозоля ранее использовался фотоэлектрический счетчик частиц АЗ-5, выпускавшийся Выборгским приборостроительным заводом (СССР). В настоящее время установлен фотоэлектрический счетчик GRIMM (ФРГ). Для сохранения репрезентативности ряда по счетной концентрации аэрозоля, при смене приборов, были проведены сопоставительные измерения в течение двух лет с целью получения переводных коэффициентов для показаний одного счетчика по отношению к другому. Приборы

\* Павел Николаевич Антохин (arn@iao.ru); Михаил Юрьевич Аршинов (michael@iao.ru); Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru); Татьяна Константиновна Складнева (tatyana@iao.ru); Геннадий Николаевич Толмачев (tgn@iao.ru).

не реже 1 раза в неделю калибруются с помощью соответствующих генераторов.

На TOR-станции кроме озона и аэрозоля измеряются давление, температура и влажность воздуха, скорость и направление ветра, интегральная и ультрафиолетовая солнечная радиация, оксид и диоксид азота и углерода, метан, диоксид серы и сероводород. Забор воздуха для газоанализаторов и фотоэлектрических счетчиков осуществляется на высоте 4 м от поверхности земли.

Измерения выполняются круглосуточно и круглогодично в начале каждого часа суток с усреднением 10 мин и частотой отсчетов 1 Гц. В идеале для среднегодовой оценки должно получаться  $24 \times 365 = 8760$  десятиминутных отсчетов. Фактическая величина колеблется от 7600 до 8000, так как приходится отбрасывать 5–10% случаев, когда в регионе наблюдаются лесные пожары, и такое же количество при переносе шлейфа выбросов от города в районе наблюдений. Данные ежечасно обновляются и доступны широкому кругу ученых через Интернет по адресу: <http://meteo.iao.ru>.

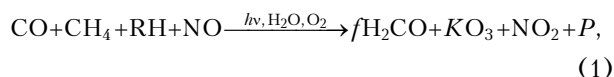
Выполненные к настоящему времени измерения, как это видно из рис. 1, охватывают для озона 22-й и 23-й циклы солнечной активности. Мониторинг аэрозоля начался раньше, на нисходящей ветви 21-го цикла.

Из рис. 1 следует, что среднегодовая счетная концентрация аэрозоля (диаметр  $> 0,4$  мкм) изменяется с периодом, близким к 11 годам, от 22–24 до 2–4 см<sup>-3</sup>, т.е. в 5–10 раз. Многолетние вариации среднегодовой концентрации озона несколько

меньше: от 45–48 до 14–20 мкг/м<sup>3</sup>, или их амплитуда изменяется в 2–3 раза. Подобных вариаций счетной концентрации аэрозоля в литературе нам обнаружить не удалось. Мониторинг в основном ведется в крупных городах. И результаты измерений, естественно, отягощены антропогенным воздействием. Данные же по озону, опубликованные в [13], показывают, что в некоторых регионах вариации могут быть и более значительными [7].

Из рис. 1 видно, что среднегодовые концентрации озона и аэрозоля запаздывают по отношению к ходу солнечной активности (радиоизлучение на длине волны 10,7 см) на 2 или 3 года, причем в каждом цикле сдвиг кривых ведет себя по-разному. В одном цикле сдвиг составляет 2 года, в другом цикле – 3 года. Причину этого запаздывания мы объяснили ранее в [4]. Здесь дадим только краткую выдержку из сделанного анализа.

Для удобства изобразим фотохимический процесс образования тропосферного озона и аэрозоля в виде следующего брутто-уравнения [14]:



где  $f$  – стехиометрический коэффициент преобразования углеводородов;  $K$  – коэффициент выхода озона, зависящий от концентрации оксидов азота, которые переключают цепи его генерации;  $P$  – продукты фотохимических реакций, представляющие собой аэрозольные частицы, возникающие при взаимодействии газовых компонентов.

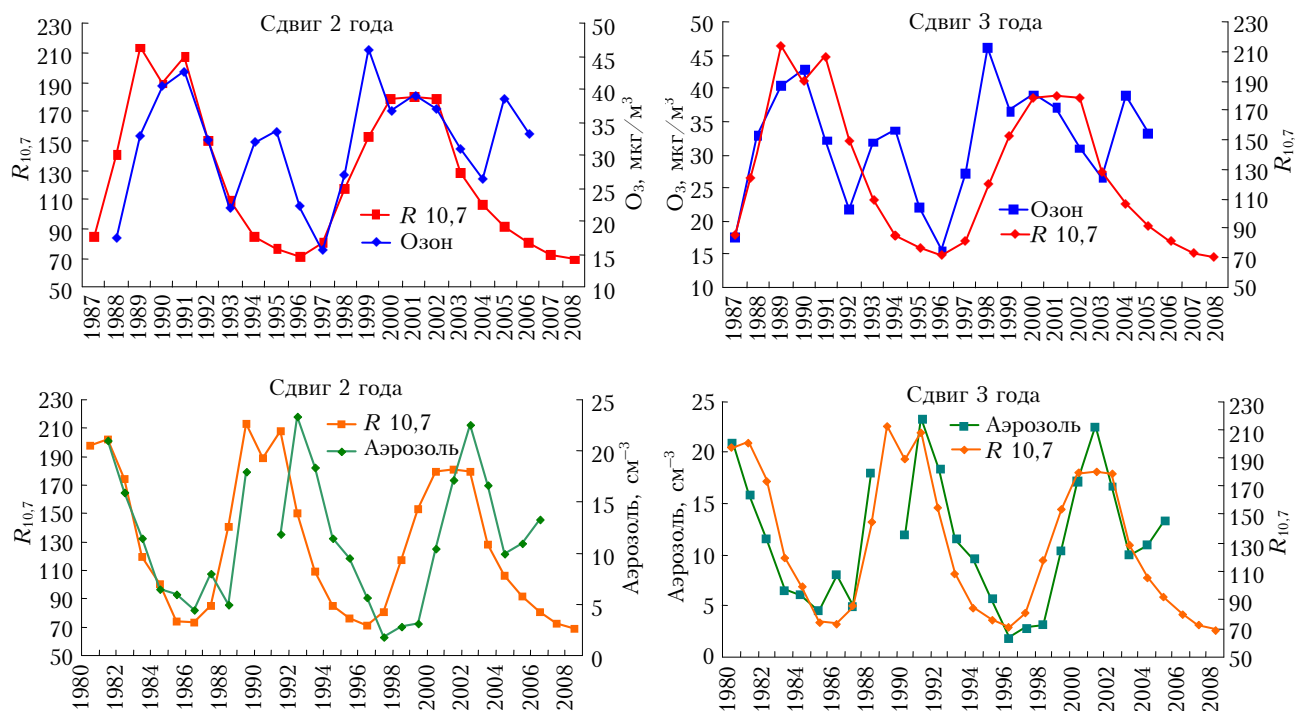


Рис. 1. Среднегодовые концентрации озона и аэрозоля в районе Томска, сдвинутые по отношению к радиоизлучению Солнца ( $R_{10,7}$ ) на 2 и 3 года соответственно

Физический смысл (1) прозрачен: первичные примеси ( $\text{CO}$  — оксид углерода,  $\text{CH}_4$  — метан,  $\text{RH}$  — неметановые углеводороды,  $\text{NO}$  — оксид азота), попадая в реальную атмосферу, в которой находятся водяной пар ( $\text{H}_2\text{O}$ ) и кислород ( $\text{O}_2$ ), под действием ультрафиолетового солнечного излучения ( $h\nu$ ) преобразуются в более токсичные соединения ( $\text{H}_2\text{CO}$  — формальдегид,  $\text{O}_3$  — озон,  $\text{NO}_2$  — диоксид азота и аэрозоль  $P$ ). Это брутто-уравнение не отражает промежуточных соединений — гидроксильных групп  $\text{OH}$ ,  $\text{HO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$  и переключающую роль оксидов азота, зато наглядно показывает, из чего образуется тропосферный озон и какие факторы его определяют. Видно, что выход озона будет зависеть от двух составляющих. Это концентрация исходных соединений, газов-предшественников и интенсивности и спектрального состава солнечной радиации.

Анализ многолетнего хода концентрации  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$  и  $\text{NO}$ , проведенный по нашим данным и результатам измерений на сети Всемирной метеорологической организации [13], не выявил периодичности, близкой к 11-летней. Следовательно, эти компоненты не были первопричиной вариаций концентрации озона и аэрозоля. Это же можно сказать и о вариациях кислорода, водяного пара и притоке солнечной радиации. Согласно [15, 16] на поверхность Земли приходит почти постоянный поток солнечного излучения, с вариациями не более 0,6%, равный  $1367 \text{ Вт/м}^2$ . Правда, внутри этих 0,6% обнаруживается 11-летняя периодичность [17, 18], хотя она вряд ли значима для тропосферных процессов.

Таким образом, неконтролируемой в уравнении (1) остается концентрация неметановых углеводородов  $\text{RH}$ . Согласно крупномасштабному исследованию В.А. Исидорова [19] основным источником поступления углеводородов в атмосферный воздух является растительность. Это же подтверждает и обобщение, сделанные позже [14]. На вопрос, почему растительность реагирует на изменение солнечной активности с запаздыванием 2–3 года, можно ответить, если обратиться к результатам многолетних опытов А. Teramura, J. Sullivan по воздействию УФ–Б-излучением на растительность [20, 21]. Ими по данным 6-летних полевых экспериментов выявлено накопление год от года отрицательного изменения растительности после воздействия на нее УФ–Б-радиацией. Ежегодно уменьшение параметров растительности в первые 2–3 года происходило на 10–15% (в зависимости от вида), а затем начинался их бурный рост. Особенно сильно этот эффект проявлялся в лесной местности. Эксперименты, проведенные позже другими авторами, подтвердили результаты А. Teramura, J. Sullivan. В [22] показано, что после начала воздействия УФ-излучением плотность растений упала на 23% в первый год и на 38% на третий год. Согласно [23], часть показателей, которыми характеризуется состояние растительности, начала восстанавливаться на третий год после воздействия УФ-излучения.

При этом возникает новый вопрос: если солнечная постоянная не изменяется [15, 16], то откуда

да возьмется воздействие УФ–Б-радиации на растительность? Более того, как показано в обзоре [24], в многолетнем ходе УФ–Б-радиация на длине волны 300 нм изменяется не более чем на 1%.

Ответ заключается в следующем. В случае отдельных вспышек, количество и интенсивность которых пропорциональны солнечной активности, УФ–Б-излучение все-таки поступает в тропосферу. По данным [25], вариации УФ–Б-излучения в случае таких событий могут составлять 100%. Причем эта часть будет составлять менее 1% в интегральном солнечном излучении. Подобные же оценки содержатся в [26]. При этом всплески излучения во время вспышек не полностью гасятся атмосферой и достигают поверхности Земли [27, 28].

Все вышеизложенное указывает на то, что в биосфере имеется объект, который реагирует на изменение УФ-радиации и может управлять одним из компонентов, являющимся основой для образования озона и аэрозоля, — углеводородами в газобразной форме, — это растительность.

Поскольку на TOR-станции концентрация углеводородов в воздухе не измерялась, то проверить все вышеизложенное «впрямую» не получается. К сожалению, и на мировой сети станций многолетних измерений углеводородов не было, поэтому проверка проводилась по косвенным параметрам. В настоящее время для оценки состояния растительности используется ряд вегетационных индексов. В работах [4, 7] был использован нормализованный дифференциальный вегетационный индекс (NDVI) для региона наблюдений, многолетние изменения величины которого сопоставлялись с ходом аэрозоля и озона. В ходе анализа были получены значимые коэффициенты корреляции.

Подтверждение запаздывания реакции растительности на всплеск УФ-радиации было найдено и в дендрохронологических данных [29]. Анализ толщины клеточной стенки и плотности клетки в годичных кольцах сосны, пихты и ели показал, что запаздывание их изменений по отношению к УФ-радиации составляет в среднем 2–3 года.

В общем виде эта связь выглядит следующим образом. В период минимума солнечной активности растительность на Земле адаптируется к отсутствию событий на Солнце, а именно ударных поступлений УФ–Б-радиации. Нарастание активности приводит к случайному, но более частому и более мощному увеличению притока УФ–Б-радиации в период солнечных событий. Растительность реагирует на это уменьшением продуктивности и, соответственно, выделением углеводородов. После 2–3-летнего периода адаптации к новым условиям продуктивность растительности увеличивается. Возрастание поступления углеводородов в воздух, при постоянстве интегрального потока солнечной радиации, вызывает рост фотохимического образования озона и аэрозоля.

На основании приведенных на рис. 1 данных были получены эмпирические связи, которые устанавливают зависимость концентрации озона или

аэрозоля от интенсивности радиоизлучения Солнца на длине волны 10,7 см. Коэффициент корреляции между среднегодовой концентрацией озона и радиоизлучением на длине волны 10,7 см оказался выше при сдвиге кривых на 2 года и составил 0,52, а между среднегодовой счетной концентрацией аэрозоля ( $d \geq 0,4$  мкм, при сдвиге на 3 года) и радиоизлучением на длине волны 10,7 см, наоборот, он выше при сдвиге на 3 года и составляет 0,81. С использованием коэффициента корреляции был вычислен коэффициент детерминации  $R^2$  и оценен вклад дисперсии радиоизлучения в дисперсии озона и аэрозоля, он составил 26,4 ( $R_{\text{крит}}^2(\alpha = 0,05) = 19,7\%$ ) и 64,3% ( $R_{\text{крит}}^2(\alpha = 0,05) = 17,9\%$ ) соответственно. Сравнение расчетных коэффициентов детерминации с критическими значениями показало, что они больше критических и, следовательно, значимы на уровне  $\alpha = 0,05$ . Полученные зависимости имеют вид

$$\begin{aligned} \text{ПКО}(t) &= -83,136 + 53,641g(R_{10,7}(t - 2)), \\ N(t) &= -3,668 + 0,118R_{10,7}(t - 3). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $\text{ПКО}(t)$  – среднегодовая приземная концентрация озона, мкг/м<sup>3</sup>;  $N(t)$  – среднегодовая счетная концентрация аэрозоля ( $d \geq 0,4$  мкм), см<sup>-3</sup>;  $R_{10,7}$  – радиоизлучение на длине волны 10,7 см, Вт/м<sup>2</sup> Гц;  $t$  – время, годы.

Для проверки адекватности полученных уравнений регрессии использовался  $F$ -критерий Фишера. Расчет  $F$ -критерия Фишера для уравнений дал следующие значения: 1,02 ( $F_{\text{крит}}(\alpha = 0,05) = 2,23$ ) и 0,36 ( $F_{\text{крит}}(\alpha = 0,05) = 2,1$ ) для среднегодовой концентрации озона и аэрозоля соответственно. Поскольку  $1,02 < 2,23$  и  $0,36 < 2,1$ , то с вероятностью 95% можно утверждать, что уравнения регрессии адекватны и способны с указанной достоверностью описывать исследуемый процесс.

Проверка устойчивости уравнений регрессии  $\text{ПКО}(t)$  и  $N(t)$  по  $F$ -критерию Фишера в зависимости от цикла дала следующий результат. В 22-м цикле значения  $F$ -критерия для  $\text{ПКО}(t)$  и  $N(t)$  равны 1,36 ( $F_{\text{крит}}(\alpha = 0,05) = 3,86$ ) и 0,36 ( $F_{\text{крит}}(\alpha = 0,05) = 3,02$ ), в 23-м цикле – 0,9 ( $F_{\text{крит}}(\alpha = 0,05) = 3,02$ ) и 0,39 ( $F_{\text{крит}}(\alpha = 0,05) = 3,02$ ) соответственно. Из анализа можно сделать вывод, что с вероятностью 95% полученные уравнения регрессии устойчивы между 22-м и 23-м циклами. Сопоставление значений ста-

тистик  $F$ -критерия Фишера показывает, что остаточная дисперсия прогноза для среднегодовой счетной концентрации аэрозоля в 23-м цикле больше, чем в 22-м, а для среднегодовой концентрации озона картина противоположная. Учитывая многообразие и разветвление процессов фотохимической генерации озона и аэрозоля в атмосфере, подобный результат не представляется неожиданным [14].

## Выбор прогноза солнечной активности в 24-м цикле

Согласно [30] процессы в атмосфере Земли не обладают значительной памятью в силу того, что всякое возмущение в ней быстро рассеивается. В космической плазме, плазме Солнца магнитные поля могут существовать очень долго и их особенности могут проследиваться десятилетиями. В этом плане прогноз, основанный на космической информации, должен быть более устойчивым, чем прогноз, опирающийся только на атмосферные данные.

В настоящее время существуют десятки различных методов прогноза солнечной активности. При этом наблюдается существенное расхождение в прогнозируемых максимальных значениях числа Вольфа ( $W$ ) или радиоизлучения на  $R_{10,7}$ . Некоторые из таких прогнозов собраны в таблице. Из нее следует, что диапазон прогнозируемых значений чисел Вольфа в максимуме солнечной активности по прогнозам может составить от 68 до 140 единиц. По обобщенным же в [31] публикациям, которые здесь не приводятся, разброс значений еще больше – от 40 до 185. Максимум солнечной активности может наступить в период с 2011 по 2014 г. Некоторые авторы [33, 35, 37] предлагают два варианта возможного сценария с разным  $W_{\text{max}}$  и разными годами максимума солнечной активности.

Из рассмотренных вариантов прогноза солнечной активности в 24-м цикле мы остановились на двух [37, 38]. Соответствующие кривые, пересчитанные в радиоизлучение на 10,7 см, приведены на рис. 2. Прогнозы выбраны исходя из того, что они дают средние значения между всеми предложенными. Это повышает вероятность, что они будут ближе к фактическому положению дел.

Из рис. 2 следует, что максимум солнечной активности наступит в 2012 или 2013 гг. и должен иметь радиоизлучение 170–175 Вт/(м<sup>2</sup> · Гц) на волне 10,7 см.

Прогноз максимальных значений чисел Вольфа и времени наступления максимумов солнечной активности

Источник	[31]	[32]	[33]	[34]	[35]	[36]	[37]	[38]
Максимум	96 ± 13	68–101	112 ± 36 136 ± 36	68 ± 17	140 120	93 ± 21	115 ± 13	117 ± 9
Дата максимума	2011	2011–2012	2011–2012	2014	2011–2014	2011–2012	2012–2013	2012

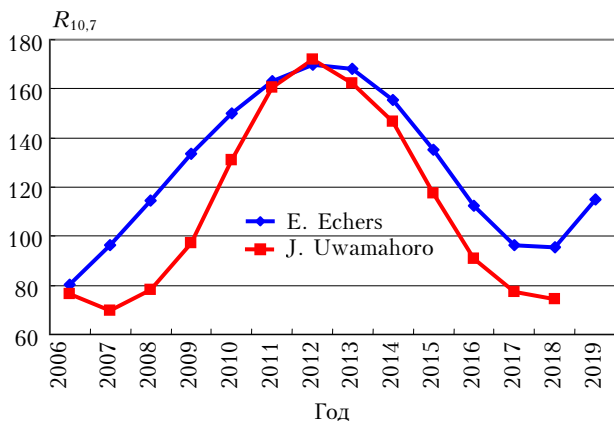
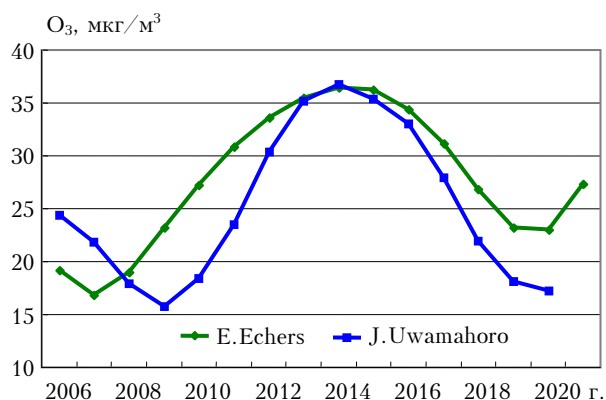


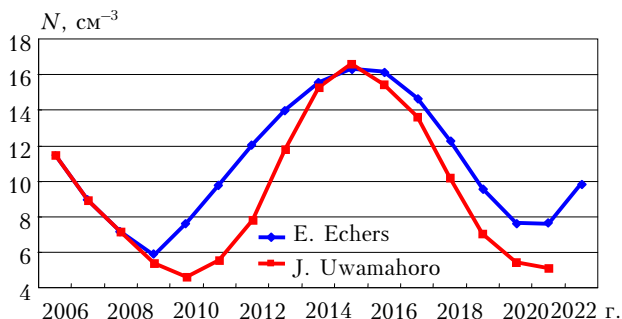
Рис. 2. Прогноз радиоизлучения на 10,7 см по [Echer et al., 2004] и по [Uwamahoro et al., 2009]

### Прогноз среднегодовых концентраций озона и аэрозоля

Воспользовавшись значениями, приведенными на рис. 2, по вышеприведенной эмпирическим формулам (2) были рассчитаны среднегодовые концентрации озона и аэрозоля. Эти расчеты даны на рис. 3 отдельно для озона (а) и аэрозоля (б). Для удобства сохранены фамилии авторов прогноза солнечной активности.



а



б

Рис. 3. Прогноз среднегодовой приземной концентрации озона (а) и аэрозоля (б) для района Томска по данным о солнечной активности

Из рис. 3 видно, что прогнозы концентрации озона и аэрозоля для разных предсказаний хода солнечной активности в прошедшем минимуме различаются на 2 года. Для озона по [37] минимум должен был наступить в 2007 г., что по данным [7] фактически и наблюдалось. По [38] минимум должен наступить в 2009 г. Это также оправдалось в [7], так как в многолетнем ходе концентрации озона в 2009 г. был зафиксирован вторичный минимум. Максимум концентрации озона ожидается по обоим прогнозам в 2014 г.

Для аэрозоля прогноз минимума концентрации не оправдался по обоим прогнозам. Согласно рис. 3, б он мог быть в 2009 или 2010 г. Фактически [7] он наблюдался в 2007 г. Максимум концентрации аэрозоля согласно обоим прогнозам должен быть в 2015 г.

В качестве критерия точности прогноза по уравнениям регрессии используется условное среднеквадратическое отклонение (стандартная ошибка) [39]. Данная ошибка оценивает суммарный вклад собственной погрешности средств измерений и уравнения регрессии. В статье [38] качество даваемого прогноза солнечной активности оценивается среднеквадратической ошибкой, которая составляет 8,5 W (число Вольфа) для величины максимума 117,5 W и [37] показывает величину ошибки 13,2 для максимального значения 115 W с вероятностью 95%. Тогда расчеты ошибки прогноза концентрации озона и аэрозоля дают следующие величины по уравнениям регрессии (2): в максимуме  $\sigma_{\text{пко}} = 8,53 \text{ мг/м}^3$  и  $\sigma_N = 3,83 \text{ см}^{-3}$  и в минимуме  $\sigma_{\text{пко}} = 2,44 \text{ мг/м}^3$  и  $\sigma_N = 1,20 \text{ см}^{-3}$ .

Дальнейшие измерения должны показать, насколько достоверен приведенный в настоящей статье прогноз.

Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН № 4, программы ОНЗ РАН № 5, междисциплинарных интеграционных проектов СО РАН № 35, 70 и 131, грантов РФФИ № 11-05-00470, 11-05-00516, 11-05-93116 и 11-05-93118 госконтрактов Минобрнауки № 02.740.11.0674, 14.740.11.0204 и 11.519.11.5009.

1. Чижевский А.Л. Земное эхо солнечных бурь. М.: Мысль, 1973. 367 с.
2. Владимирский Б.М., Темурияц Н.А. Влияние солнечной активности на биосферу—ноосферу (Гелиобиология от А.Л. Чижевского до наших дней). М.: МНЭПУ, 2000. 374 с.
3. 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.
4. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Ковалевский В.К., Расказчикова Т.М., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н. Роль солнечной активности в многолетней изменчивости фотохимических компонент воздуха в нижней тропосфере // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15, № 12. С. 1056–1071.
5. Панкратов А.К., Норманский В.Я., Владимирский Б.М. Фазовая диаграмма солнечной активности и прогноз

- активности на предстоящий 23-й цикл // Биофизика. 1998. Т. 43, № 5. С. 883–887.
6. Schatten K., Hoyt D. Solar cycle 23 forecast update // Geophys. Res. Lett. 1998. V. 25, N 5. P. 599–601.
  7. Антохин П.Н., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н. Многолетняя изменчивость озона и аэрозоля в районе Томска и оправдываемость прогноза их среднегодовых концентраций в 23-м цикле солнечной активности // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 9. С. 772–776.
  8. Хандожко Л.А. Метеорологическое обеспечение народного хозяйства. Л.: Гидрометеоиздат, 1981. 232 с.
  9. Livingston W., Penn M. Are sunspots different during this solar minimum? // EOS. 2009. V. 90, N 30. P. 257–258.
  10. Белов А.В., Гайдаш С.П. Аномально низкая солнечная и геомагнитная активность в 2007 году // Геомагнет. и аэроном. 2009. Т. 49, № 5. С. 595–602.
  11. Иванов К.Г., Харшиладзе А.Ф. Начало нового, 24-го цикла солнечной активности в крупномасштабном открытом магнитном поле Солнца // Геомагнет. и аэроном. 2008. Т. 48, № 3. С. 291–296.
  12. Распопов О.М., Дергачев В.А. Экстремальные солнечные события в прошлом и настоящем столетии как проявление долговременных вариаций солнечной активности // Геомагнет. и аэроном. 2005. Т. 45, № 3. С. 324–328.
  13. WMO WDCGG Data summary. 2009, N 33. 99 p.
  14. Белан Б.Д. Озон в тропосфере. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2010. 488 с.
  15. Скляров Ю.А., Бричков Ю.И., Семенова Н.В. Радиационный баланс Земли. Введение в проблему. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2009. 188 с.
  16. Wild M. Global Dimming and Brightening: A review // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. D00D16, doi: 10.1029/2008JD011470.
  17. Скляров Ю.А., Двинских В.А., Бричков Ю.И., Котума А.И. Переменность потока излучения Солнца и ее земные проявления // Исслед. Земли из космоса. 1998. № 6. С. 40–46.
  18. Goode P.R., Palle E. Shortwave forcing of the Earth's climate: Modern and historical Variations in the Sun's irradiance and the Earth's reflectance // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2007. V. 69, N 13. P. 1556–1568.
  19. Исидоров В.А. Летучие выделения растений: состав, скорость эмиссии и экологическая роль. СПб.: Алга, 1994. 188 с.
  20. Sullivan J.H., Teramura A.N. The effects of ultraviolet-B radiation on loblolly pines. 2. Growth of field-grown seeding // Trees. 1992. V. 6, N 1. P. 115–120.
  21. Teramura A.H., Sullivan J.H. Effects of UV-B radiation on photosynthesis and growth of terrestrial plants // Photosyn. Res. 1994. V. 39, N 3. P. 463–473.
  22. Bianciotto O.A., Pinedo L.B., San Roman N.A., Blesio A.Y., Collantes M.B. The effects of natural UV-B radiation on a perennial Salicornia salt-marsh in Bahia San Selactian, Tierra del Fuego, Argentina: a 3-year field study // J. Photochem. Photobiol. 2003. V. 70, N 3. P. 177–185.
  23. Rousseaux M.C., Scopel A.L., Searles P.S., Caldwell M.M., Sala O.E., Ballare C.L. Responses to solar ultraviolet-B radiation in a shrub-dominated natural ecosystem of Tierra del Fuego (southern Argentina) // Global Change Biology. 2001. V. 7, N 4. P. 467–478.
  24. Lean J. Solar ultraviolet irradiance variations: a review // J. Geophys. Res. D. 1987. V. 92, N 1. P. 839–868.
  25. Lean J., Rottman G.J., Kyle H.L., Woods T.N., Hickey J.R., Puga L.C. Detection and parameterizations of variations in solar mid- and near-ultraviolet radiation (200–400 nm) // J. Geophys. Res. D. 1997. V. 102, N 25. P. 29939–29956.
  26. Fligge M., Solanki S.K., Pap J.M., Frohlich C., Wehrli Ch. Variations of solar spectral irradiance from near UV to the infrared-measurements and results // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2001. V. 63, N 14. P. 1479–1487.
  27. Gurney K.R. Evidence for increasing ultraviolet irradiance at Point Barrow, Alaska // Geophys. Res. Lett. 1998. V. 25, N 6. P. 903–906.
  28. Larkin A., Haigh J.D., Djavidnia S. The effect of solar UV irradiance variations on the earth's atmosphere // Space Sci. Rev. 2000. V. 94, N 1–2. P. 199–214.
  29. Зуев В.В., Бондаренко С.Л., Зуева Н.Е., Силкин П.П., Шамкин А.В., Золотарев К.А., Шапоренко А.В. Комплексные исследования значимых откликов в годичных кольцах хвойных деревьев на воздействие солнечной УФ-Б радиации // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20, № 5. С. 438–442.
  30. Дружинин И.П., Сазонов Б.И., Ягодинский В.Н. Космос–Земля. Прогнозы. М.: Мысль, 1974. 288 с.
  31. Крячко А.В., Нусинов А.А. Прогнозирование солнечных циклов стандартным методом // Геомагнет. и аэроном. 2008. Т. 48, № 2. С. 153–156.
  32. Огуцов М.Г. Прогноз 24-го цикла солнечной активности на основе информации о солнечной активности за последние 10000 лет // Геомагнет. и аэроном. 2009. Т. 49, № 3. С. 427–430.
  33. Kane R.P. Prediction of solar cycle 24 based on the Gnevgskev–Ohl–Kopecky rule and three-cycle periodicity scheme // Ann. Geophys. 2008. V. 26, N 11. P. 3329–3339.
  34. De Jader C., Duhau S. Forecasting the parameters of sunspot cycle 24 and beyond // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2009. V. 71, N 2. P. 239–245.
  35. Dikrati M. Predicting cycle 24 using various dynamo-based tools // Ann. Geophys. 2008. V. 26, N 2. P. 259–267.
  36. Baranovski A.L., Clette F., Nollau V. Nonlinear solar cycle forecasting: theory and perspectives // Ann. Geophys. 2008. V. 26, N 2. P. 231–241.
  37. Echers E., Rigozo N.R., Nordemann D.J.R., Viera L.E.A. Prediction of solar activity on the basis of spectral characteristics of sunspot number // Ann. Geophys. 2004. V. 22, N 6. P. 2239–2243.
  38. Uwamahoro J., Mc Kinnell L.A., Cilliers P.J. Forecasting solar cycle 24 using networks // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2009. V. 71, N 5. P. 569–574.
  39. Исцаев А.А. Статистика в метеорологии и гидрологии. М.: Изд-во МГУ, 1988. 248 с.

*P.N. Antokhin, M.Yu. Arshinov, B.D. Belan, T.K. Sklyadneva, G.N. Tolmachev. Forecast of variations in ozone and aerosol concentrations based on the forecast for the 24<sup>th</sup> solar cycle.*

On the basis of the established empirical dependence between change of concentration of ozone and an aerosol in a ground layer of air in area of Tomsk and a course of solar activity in 21–23 eleven-year cycles (a radio emission on length of a wave of 10.7 cm), on the literary data on the forecast of solar activity on 24th eleven-year cycle, the forecast of change of mid-annual concentration of ozone and an aerosol till 2021 is given. Proceeding measurements of ozone and aerosol and monitoring of solar activity will allow forecast verification.