

В.Л. Потемкин¹, Э.В. Шультайс²

Сезонная динамика концентрации приземного озона над Восточным Саяном

¹ Лимнологический институт СО РАН,

² Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск

Поступила в редакцию 29.01.2004 г.

Приведены экспериментальные данные по многолетней динамике приземной концентрации озона (ПКО) над районом Восточного Саяна (Сибирь). Обсуждаются сезонные и суточные колебания ПКО. Определено запаздывание наступления максимума ПКО относительно общего содержания озона в атмосфере (в среднем 42 дня, коэффициент корреляции составил 0,8). Это является подтверждением гипотезы о вертикальном перемещении озона: скорость осаждения озона из стратосферы менее 1 см/с.

Изучение малых газовых составляющих атмосферы дает важную информацию для моделирования и предсказания будущего состояния земной климатической системы. Озон представляет интерес и с биологической точки зрения из-за своей высокой токсичности и химической активности. Вопрос тропосферного озона пока не выходит за рамки городских проблем. В отличие от стратосферного озона концентрации озона вблизи земной поверхности возрастают со скоростью 1–2% в год [1]. Результатом данной работы явился анализ поведения приземного озона над Восточным Саяном по данным наблюдений, полученным на ст. Монды.

Величина общего содержания озона (ОСО) в вертикальном столбе воздуха — это основная характеристика атмосферного озона. Стратосферный озон контролируется сетью наземных озонметрических станций (Global Ozone Network) и измерительными системами TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometers), установленными с 1978 г. на спутниках Nimbus-7 и Meteor-3 (NASA). В Сибирском регионе эти работы поставлены достаточно хорошо [2–4]. Данные об ОСО систематически публикуются, доступны всем ученым и проработаны в литературе довольно подробно. Для широты и долготы ст. Монды (51,6° с.ш., 101° в.д.) была произведена выборка ежесуточных значений для восстановления рядов с ноября 1978 по декабрь 2001 г., длина ряда составила 22 года [5].

Для приземной концентрации озона (ПКО) характерна большая пространственная и временная изменчивость. Если для городских условий рост и сток озона связаны с местными загрязнителями, то для фоновых районов на первое место выходят естественные причины. Несмотря на большой массив имеющихся данных, причины изменчивости ПКО остаются не до конца ясными. Поэтому с 1996 г. начала работу фоновая озонная станция, организованная Российской академией наук совместно с Исследовательским центром науки и технологии при Токийском университете [6].

Организация этой станции мониторинга вызвана необходимостью прояснить сезонную и суточную динамику ПКО в фоновых условиях континентального климата. Станция расположена на территории Саянской солнечной обсерватории Института солнечно-земной физики СО РАН в пос. Монды (Восточный Саян, высота над уровнем моря 2010 м). Ближайшие населенные пункты — в нескольких десятках километров от станции в долине. От крупных промышленных центров (Иркутск, Байкальск) она удалена более чем на 300 км и закрыта хр. Хамар-Дабан и Восточным Саяном. Станция снабжается промышленным электричеством, каких-либо существенных собственных источников загрязнения атмосферы не имеет. На этой станции в течение семи лет ведутся постоянные наблюдения за химическим составом аэрозолей. Показано, что по массовой концентрации и элементному составу аэрозолей ст. Монды может считаться фоновой для Восточной Сибири [7].

Измерения озона в приземном слое атмосферы проводились с помощью озонметра Dylec Model 1007-АНJ с одноминутным усреднением. Погрешность прибора не превышает 10%. Одновременно велась запись атмосферного давления и температуры воздуха в помещении, где находился прибор. Регистрация замеров полностью автоматизирована и производится на компьютере.

1. Суточный ход ПКО

По суточным данным ПКО были рассчитаны изменчивость и суточная динамика по центральным месяцам сезонов как наиболее ярко выраженным (рис. 1). Во всех случаях минимальные концентрации наблюдаются в ночные и утренние часы, максимальные — в дневные и вечерние. При отсутствии антропогенных источников загрязнения атмосферы суточный ход концентрации озона обусловлен внутрисуточной динамикой слоя перемешивания и слоя ночной температурной инверсии вблизи земной поверхности, а также высотным расположением станции.

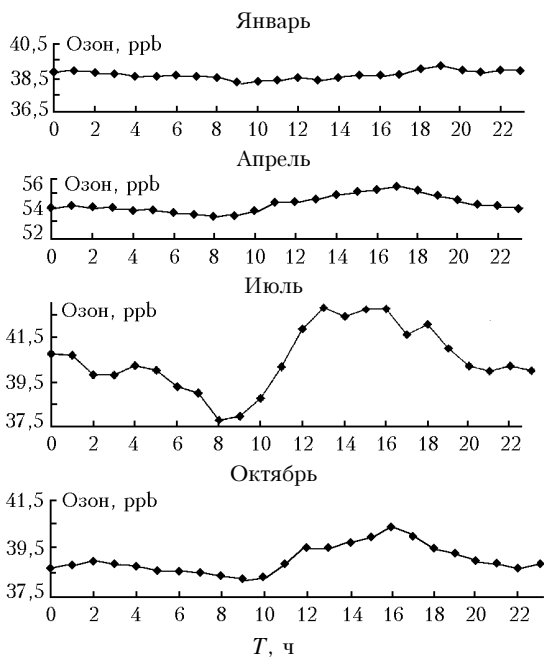


Рис. 1. Средний суточный ход приземной концентрации озона

Например, этим объясняется слабое убывание озона в ночные часы. Весной дневные изменения составляют 2–4, а летом 4–8 ppb. Дневной максимум вызван фотохимическими процессами из-за повышенной инсоляции в данном регионе и высокой продукцией растительностью озонобразующих газов (окислов азота и углерода). Зимой изменения ПКО в течение суток имеют невыраженный характер. Связано это с тем, что местные источники озона в этот период отсутствуют и поддержка осуществляется за счет постоянного притока озона из верхних слоев атмосферы (см. п. 4).

2. Годовой ход ПКО

Для исследования годовой динамики приземной концентрации озона был взят ряд наблюдений с 1.11.1996 по 18.12.2001 г. Ряд содержит 1792 значения (имеются разрывы в ряду из-за отключения электричества во время гроз и штормовых ветров). Среднегодовое значение ПКО $[(43 \pm 5) \text{ ppb}]$ на ст. Монды несколько выше наблюдаемых в Европе (30–34 ppb) [8, 9] и Западной Сибири (20–30 ppb) [10]. Однако следует учитывать возвышенное положение ст. Монды. В этом случае, сравнивая результаты, полученные на ст. Монды, с результатами измерений озона в горных чистых районах Европы, можно говорить, что они близки [11–13] (озонная станция Arosa, Альпы, 1840 м над у.м. — среднегодовое значение приземных концентраций озона составляет 42–43 ppb; на Кисловодской высокогорной станции, 2070 м над у.м., весной наблюдались концентрации озона 45–60 ppb). Эти величины также соответствуют подобным измерениям в Восточной Азии [14] [ст. Нарро, 1820 м над у.м. — среднегодовое значение приземного озона $(46 \pm 4) \text{ ppb}$]. В горах

арх. Шпицберген августовские концентрации приземного озона составляют в среднем 30 ppb с возможным ростом до 120% при смене ветров [15].

Годовой ход ПКО (рис. 2) имеет ярко выраженный максимум, приходящийся на конец апреля — начало мая (за исследуемый период время наступления максимума колебалось с 22.04 по 9.05).

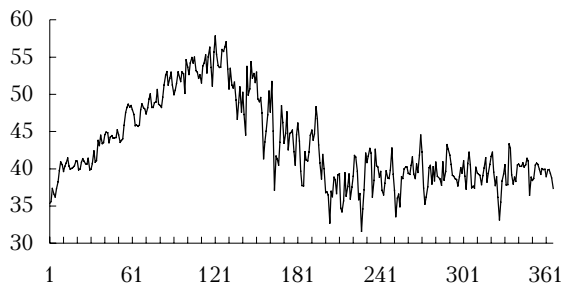


Рис. 2. Среднегодовой ход ПКО

За весь период наблюдений максимальное значение ПКО было зафиксировано 6.05.1999 г. (72,7 ppb), среднее многолетнее значение максимума составляет 58 ppb.

Четко выраженного минимума в годовом ходе ПКО не наблюдается. После весеннего максимума следует падение концентрации, продолжающееся до середины лета. Затем значение ПКО колеблется около некоторой средней величины (31–34 ppb), без каких-либо четких максимумов или минимумов до холодного периода. Но этот период характеризуется очень высокой суточной изменчивостью (5–8 ppb) (рис. 3), зимой межсуточная амплитуда не превышает 1 ppb.

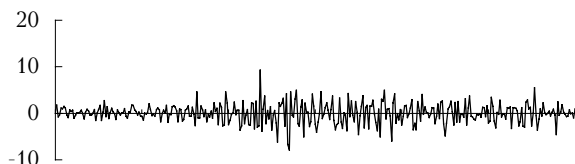


Рис. 3. Межсуточная средняя изменчивость ПКО

Средняя годовая амплитуда ПКО равна 26 ppb, а максимальная за анализируемый период составила 45,3 ppb (сезон 2001 г.).

3. Другие периодичности колебаний ПКО

Проведенный спектральный анализ ряда выявил несколько основных периодов изменения в динамике ПКО. Основной вес приходится на период 22,8 дня (что близко к периоду 21,3 дня для изменчивости ОСО), так же можно выделить ритмы длиной 12,8 и 7,1 дня синоптического характера. Но данные периоды имеют небольшую спектральную плотность по отношению к большим периодам изменения — годовой и полугодовой вариациям. Имея длинный ряд однородных наблюдений, всегда интересно провести корреляционный анализ на выявление тенденций в развитии данного параметра.

Для января автокорреляционная кривая была монотонно спадающей, что свидетельствует о случайном распределении дневных ПКО без явных источников. Начиная с апреля кривые имели вторичный максимум при временном сдвиге 22–24 ч, что подразумевает постоянный источник в течение дня (инсоляция). Апрель – переходный месяц разрушения Сибирского антициклона. В этот период наблюдается малоградиентное барическое поле и устанавливается солнечная погода. В такие дни в горных районах существует циркуляция между долиной и окружающими хребтами с четко выраженной суточной периодичностью. Для августа автокорреляционная кривая ПКО также имеет сдвиговый максимум на 20–24 ч.

4. Зависимость приземной концентрации озона от общего содержания в атмосфере

Известно, что максимальная концентрация озона наблюдается на высотах от 20 до 30 км (т.е. в стратосфере, где находится 85–89% всего озона [16]), поэтому можно условно считать, что изменения общего содержания озона в столбе атмосферы есть, в основном, изменения стратосферного озона. По существующей гипотезе основным источником формирования ПКО является стратосферный озон, и должна существовать связь между ОСО и ПКО. Используя скользящее 30-дневное усреднение (для устранения мелких периодичностей, вызванных, в частности, синоптическими процессами), провели кросс-корреляционный анализ рядов ОСО и ПКО.

При сравнении вариаций ОСО и ПКО было определено запаздывание наступления максимумов и минимумов ПКО относительно ОСО, которое колеблется в пределах от 33 до 52 дней, а в среднем составляет 42 дня (при 30-дневном усреднении и лаге 42 дня коэффициент корреляции составил 0,79, рис. 4). Это является подтверждением теории о концентрации озона как консервативном свойстве атмосферных масс и гипотезы Петцольда о скорости вертикального перемещения озона: скорость вертикального движения озона составляет примерно 0,5–1 см/с на высотах ниже 25 км [17].

5. Связь ПКО с метеорологическими параметрами

Указания на связь ПКО и метеорологических факторов можно найти у многих исследователей. Еще в 1945 г. Добсон писал, что во время грозы общее количество озона может увеличиваться в 2 раза. Например, А.Х. Хргиан [16] указывает на 2–10-кратное увеличение ПКО перед грозой. В дни с повышенной прозрачностью воздуха возможно увеличение ПКО в 1,5–2 раза. Прохождение фронта, смена направления ветра также могут вызвать повышение ПКО, а вот осадки, наоборот, способствуют уменьшению концентрации вследствие стока озона на их поверхности [18]. Для изучения этого вопроса в ряду наблюдений были отобраны несколько дней с осадками и ветром, когда данные приборов дополняются непосредственными визуальными наблюдениями.

Наблюдения, сделанные во время грозы 26 июня 1999 г. (рис. 5), подтвердили гипотезу об опережении роста концентрации озона. Гроза с громом,

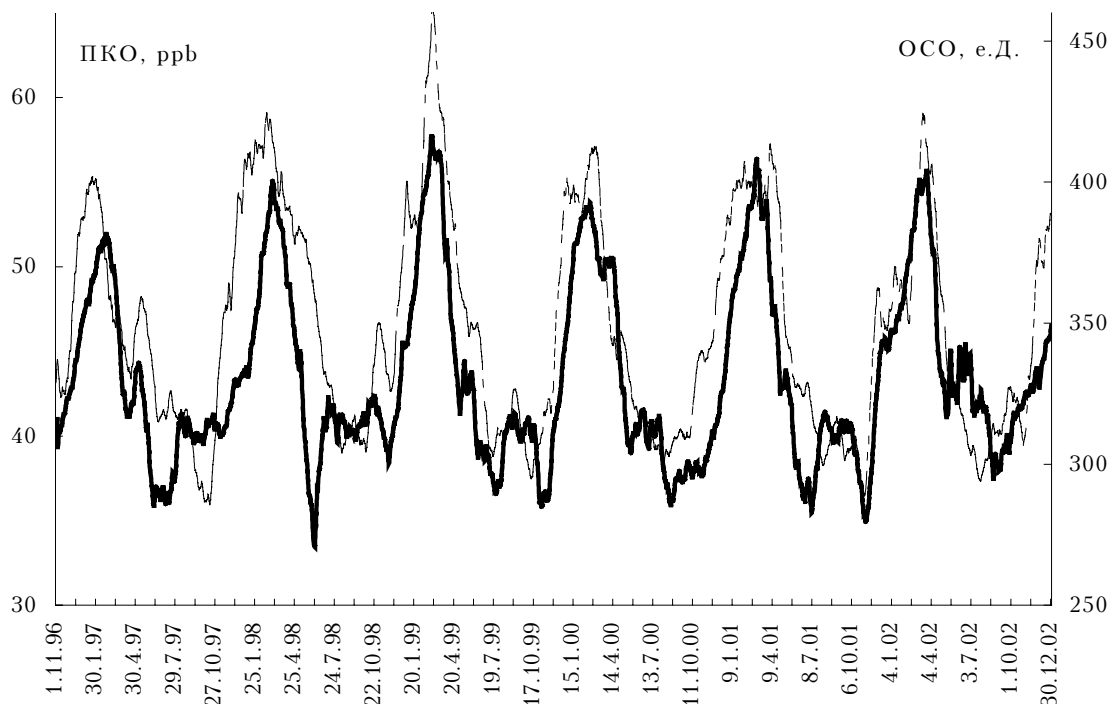


Рис. 4. Сравнение шестилетних рядов общего содержания озона (ОСО, пунктирная линия) и приземной концентрации (ПКО, сплошная линия) при лаге 42 дня

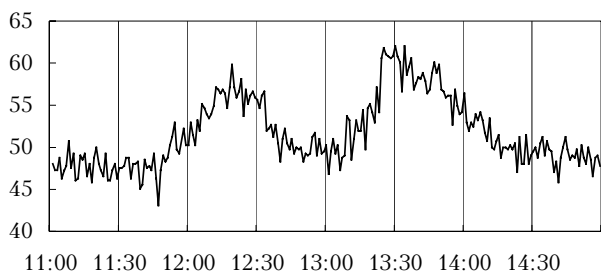


Рис. 5. Вариации ПКО во время прохождения грозы 26.06.99 г.

градом (до 5 мм) и шквальным ветром до 15 м/с наблюдалась с 13:30 до 14:00. Уже примерно за 2 ч до грозы (около 11:30) начинается увеличение концентрации, с небольшим понижением около 12:30, продолжающееся до момента начала грозы. Затем следует снижение концентрации, продолжающееся все время грозы и еще около получаса позже, до средних значений. Максимум ПКО наблюдался в момент начала грозы и составил 62 ppb.

27 апреля 2000 г. до 18:00 наблюдался южный ветер 5–10 м/с, затем ветер стал стихать и к 18:45 перешел на северо-западный, скорость которого к 19:30 дошла до 15–20 м/с. Соответственно после 18:00 началось снижение ПКО (рис. 6), продолжавшееся до 18:30, потом произошел небольшой подъем, связанный, очевидно, с переменной направления ветра, и с 19:00 продолжилось снижение ПКО. Резкий спад около 21:00 связан с начавшимся снегопадом. Значение концентрации упало с 61 ppb в 18:00 до 37 ppb в 21:00.

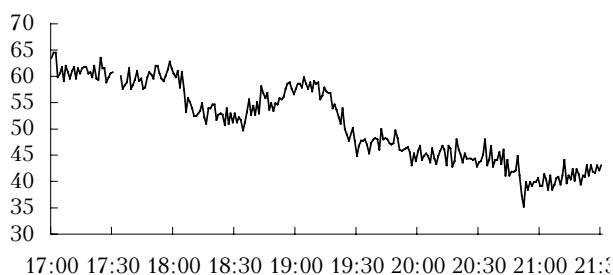


Рис. 6. Изменение ПКО во время смены направления ветра и снегопада 27.04.00 г.

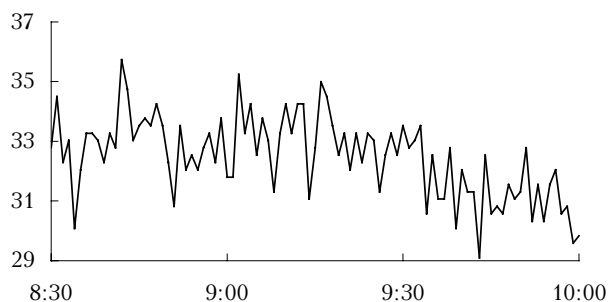


Рис. 7. Падение ПКО во время снегопада 11.10.01 г. (снег пошел в 9:30)

Наблюдения 11 октября 2001 года во время снегопада также согласуются с гипотезами [18] (рис. 7). Понижение концентрации озона началось практически одновременно со снегопадом.

Заключение

Пятилетние непрерывные наблюдения за изменчивостью атмосферного озона в горном районе позволили определить источники, влияющие на его динамику. Изменчивость концентрации приземного озона определяется, в основном, метеорологическими условиями, осложненными в горах местными видами циркуляции. Получена статистически значимая связь приземного озона со стратосферным в течение года, что обеспечивает более высокие значения концентрации озона в сравнении с равнинными районами.

1. Ровинский Ф.Я., Егоров В.И. Озон, окислы азота и серы в нижней атмосфере. Л.: Гидрометеопиздат, 1986. 183 с.
2. Зуев В.В. Лидарные и спектрофотометрические наблюдения стратосферного озонового слоя над Томском // Оптика атмосф. и океана. 1996. Т. 9. № 9. С. 1171–1183.
3. Жеребцов Г.А., Казимировский Э.С., Кокоуров В.Д., Кошелев В.В. Изучение озонной проблемы в Институте солнечно-земной физики СО РАН // Оптика атмосф. и океана. 1996. Т. 9. № 9. С. 1255–1261.
4. Белан Б.Д., Зуев В.В., Складнева Т.К., Смирнов С.В., Толмачев Г.Н. О роли суммарного озона в фотохимическом образовании его тропосферной части // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13. № 10. С. 928–932.
5. Сайт NASA <ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/eptoms/data/>.
6. Потемкин В.Л., Нецветова О.Г., Ходжер Т.В., Акимото Н., Каджи Й., Почанарт П. Длительные наблюдения приземных концентраций озона и окиси углерода в Восточной Сибири // Сиб. экол. ж. 1999. № 6. С. 601–603.
7. Ходжер Т.В., Потемкин В.Л., Оболкин В.А., Нецветова О.Г. Станция «Монды» как фоновая станция для изучения переноса загрязняющих веществ в нижней атмосфере Прибайкалья // Оптика атмосф. и океана. 1998. Т. 11. № 6. С. 636–639.
8. Laurila T. and Lattila H. Surface ozone exposures measured in Finland // Atmos. Environ. 1994. V. 28. P. 103–112.
9. Simmonds P.G., Seuring S., Nickless G., and Derwent R.G. Segregation and interpretation of ozone and carbon monoxide measurements by air mass origin at the TOR station Mace Head, Ireland from 1987–1995 // J. Atmos. Chem. 1997. V. 28. P. 45–65.
10. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Зуев В.Е., Краснов О.А., Пирогов В.А., Складнева Т.К., Толмачев Г.Н. Многолетние вариации приземной концентрации озона как отражение солнечной активности // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15. № 11. С. 987–992.
11. Cvitas T., Kezele N., Klasinc I. Boundary-Layer ozone in Croatia // J. Atmos. Chem. 1997. V. 28. P. 125–141.
12. Pochanart P., Akimoto H., Maksyutov S., Staehelin J. Surface ozone at the Swiss Alpine site Arosa: the hemispheric background and the influence of large-scale anthropogenic emissions // Atmos. Environ. 2001. V. 35. P. 5553–5566.
13. Кузнецова И.Н., Еланский Н.Ф., Шалыгина И.Ю., Кадыгров Е.Н., Лыков А.Д. Инверсии температуры и их влияние на концентрации приземного озона

- в окрестностях Кисловодска // Метеорол. и гидрол. 2002. № 9. С. 40–51.
14. *Kajii Y., Someno K., Tanimoto H., Hirokawa J., Aki-moto H., Katsino T., Kawara J.* Evidence for the seasonal variation of photochemical activity of tropospheric ozone and CO at Harpo, Japan // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. P. 3505–3508.
15. *Шумилов О.И., Касаткина Е.А., Распопов О.М., Мин-галев И.В.* Вариации приземного озона в арктических горах (арх. Шпицберген) // *Геомагнетизм и аэрон.* 2002. Т. 42. № 6. С. 798–804.
16. *Хрзуан А.Х.* Физика атмосферного озона. Л.: Гидро-метеониздат, 1973. 289 с.
17. *Хвостиков И.А.* Высокие слои атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1964. 605 с.
18. *Лунин В.В., Попович М.П., Ткаченко С.Н.* Физическая химия озона. М.: Изд-во МГУ, 1998. 480 с.

V.L. Potemkin, E.V. Schultais. **Seasonal changes of ozone concentration over East Sayan (Eastern Siberia).**

Results of long-term continuous observations on perigeal ozone concentrations at the background monitoring station in Mondy (Eastern Siberia) are presented. The aspects of ozone seasonal cycle and diurnal variations are discussed. Problems of interaction with stratospheric ozone (delay by 42 days; correlation coefficient of 0.8) are addressed as well. This confirms the hypothesis about the vertical transport of ozone: the rate of ozone deposition from the stratosphere is lower than 1 cm/s.