

## СУТОЧНАЯ ДИНАМИКА ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

П.Н. Антохин, В.Г. Аршинова, М.Ю. Аршинов, Б.Д. Белан, С.Б. Белан, Д.К. Давыдов, А.В. Козлов,  
О.А. Краснов, О.В. Праслова, Т.М. Рассказчикова, Д.Е. Савкин, Г.Н. Толмачев, А.В. Фофанов

### DAILY BEHAVIOR OF THE VERTICAL DISTRIBUTION OF GREENHOUSE GASES IN THE ATMOSPHERIC BOUDARY LAYER

P.N. Antokhin, V.G. Arshinova, M.Yu. Arshinov, B.D. Belan, S.B. Belan, D.K. Davydov, A.V. Kozlov,  
O.A. Krasnov, O.V. Praslova, T.M. Rasskazchikova, D.E. Savkin, G.N. Tolmachev, A.V. Fofonov

В работе приведены результаты суточного самолетного зондирования атмосферы, выполненные на самолете Ан-2 в фоновом районе Томской области над измерительной мачтой, входящей в состав проекта «Башня». Построены вертикальные профили распределения углекислого газа и озона. По экспериментальным данным было обнаружено фотохимическое образование озона в пограничном слое атмосферы. В нем наблюдается заметный суточный ход распределения озона, который определяется его образованием в период активной фотохимической генерации.

The paper presents the results of the daily sounding of the atmosphere made onboard An-2 plane in Tomsk region above the measuring mast which is a part of the "Tower" project. Vertical profiles of ozone and carbon dioxide distributions are shown. Photochemical ozone generation in the boundary layer has been found experimentally. The marked diurnal course of ozone distribution is observed in this layer. This course is determined by ozone active photochemical generation.

Пограничный слой регулирует потоки энергии, количества движения и перенос примесей между подстилающей поверхностью и свободной тропосферой [Baklanov et al., 2011]. В ночное время примеси накапливаются во внутреннем слое перемешивания, а после восхода Солнца и разрушения этого слоя за счет усиления турбулентного обмена распространяются внутри всего пограничного слоя атмосферы (ПСА) [Белан, 1994; Балин, Ершов, 1999]. Важность динамики пограничного слоя для состояния атмосферы обуславливает и особый интерес к изучению. Несмотря на длительную историю исследования строения пограничного слоя и распределения в нем газовых и аэрозольных компонентов, многие аспекты проблемы остаются не до конца понятными [Baklanov et al., 2011]. Целью настоящей работы является экспериментальное исследование суточной динамики вертикального распределения озона в пограничном слое атмосферы.

Для измерения его параметров был создан измерительный комплекс на базе самолета Ан-2. Полное описание комплекса имеется в [Антохин и др., 2012]. Измерения профиля проводятся над постом измерения парниковых газов российско-японского проекта «Башня» [Аршинов и др., 2006]. Пост представляет собой оснащенную исследовательским оборудованием мачту, расположенную внутри большого лесного массива на удалении 60 км от г. Томска (координаты поста: 54°08' с.ш. и 84°20' в.д.). Благодаря такой комбинации удается получить профиль от поверхности земли до высоты 3000 м в летний период и до 2000 м в зимний. Схема выполнения зондирования также приведена в [Антохин и др., 2012].

Для более эффективного выявления суточной динамики озона при проведении экспериментов на территории района измерений выбирались условия, характерные для антициклона. Однако это условие не всегда выдерживалось. В ходе выполнения экспериментов в 2011–2012 гг. получены вертикальные профили озона в пограничном слое атмосферы (рис. 1).

Первый эксперимент был выполнен 30 марта 2011 г. Все полеты прошли в условиях антициклона.

На рис. 1, а хорошо видна суточная динамика распределения озона. В утренние и вечерние часы концентрация значительно меньше, чем в полдень и послеполуденное время, когда фотохимическое образование озона максимально. График также иллюстрирует, хорошо известный из аэроклиматологии факт, что максимум на высотах запаздывает по отношению к приземному слою воздуха на 2–3 ч. Следующий эксперимент был проведен 30 июня 2011 г. в условиях малоградиентного поля повышенного давления (рис. 1, б). Заметен суточный ход концентрации озона в пограничном слое атмосферы. Третий эксперимент был проведен 16 сентября 2011 г. в антициклонических условиях на западной периферии обширного антициклона. Полученные вертикальные профили приведены на рис. 1, в. Видно, что фотохимическая генерация озона проявилась в пограничном слое вблизи полудня в слое под приподнятой инверсией и была достаточно интенсивной в приземном слое воздуха. Генерация началась после разрушения утренней инверсии. Эксперимент с минимумом концентрации озона в годовом ходе был проведен 14 декабря 2011 г. Синоптическая обстановка в этот день определялась обширным антициклоном с достаточно низкими температурами воздуха и мощной приземной инверсией. На рис. 1, г видно, что в зимнее время концентрация озона не выявляет значимого суточного хода в пограничном слое атмосферы, хотя температура воздуха в приземном слое изменилась весьма значительно от –26 до –19 °С. Изменения концентрации выше пограничного слоя незначительны и находятся в интервале погрешностей прибора.

Недельное планирование полетов не всегда позволяет угадать погоду, в которой должен хорошо проявляться суточный ход. Так, 29 марта 2012 г. по долгосрочному прогнозу предполагался антициклон. На самом деле только первый полет удалось выполнить в таких условиях. Затем началась перестройка барического поля. В результате через пункт зондирования прошло два теплых фронта. Конечно, смена воздушных масс нарушила обычно хорошо выраженный в циклоне суточный ход. В итоге первые три из полученных профилей отражают процесс

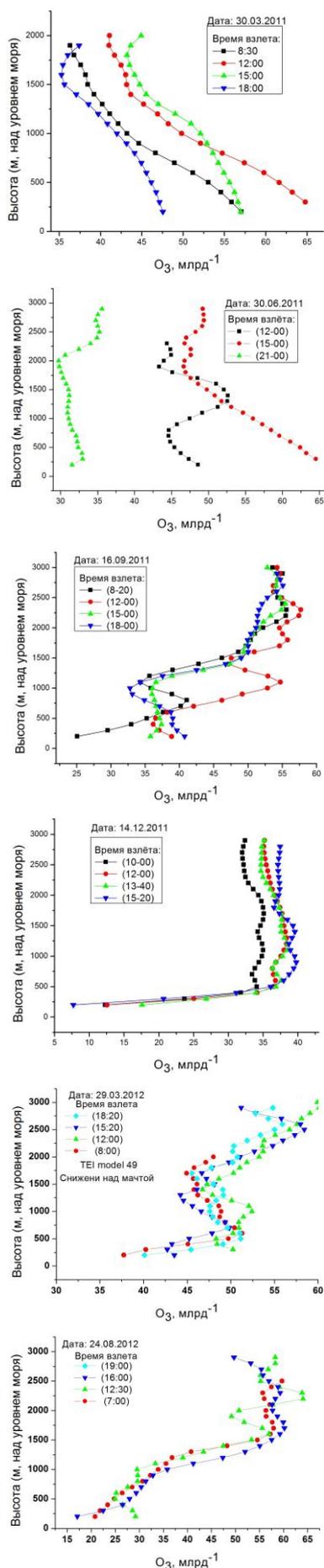


Рис. 1 Вертикальное распределение концентрации озона над п. Березоречка в 2011–2012 гг.

фотохимической генерации озона, а вечерний – смену воздушной массы (рис. 1, д). Шестой эксперимент выполнялся 24 августа 2012 г. в условиях антициклона. В этот день температура воздуха имела заметную суточную динамику. В то же время измерения не выявляют суточной динамики концентрации озона в пограничном слое. На рис. 1, е можно выделить какие-то суточные изменения только в приземном слое воздуха и вблизи верхней границы пограничного слоя.

Таким образом, из шести проведенных экспериментов три показали явное фотохимическое образование озона в пограничном слое. В двух экспериментах, которые проводились в минимумах концентрации озона в годовом ходе, явной суточной динамики зафиксировать не удалось. Один эксперимент проведен в период смены воздушных масс и для целей работы оказался неудачным. Для того чтобы рассмотреть суточную динамику озона внутри пограничного слоя атмосферы, найдем разницу концентраций между дневными и утренними профилями, послеполуденными и утренними, а также между дневными и вечерними профилями, послеполуденными и вечерними. Такие данные для наиболее характерного дня 16.03.2011 г. представлены на рис. 2. Видно, что в период с утра до полудня концентрация озона возрастала во всем пограничном слое. При этом в приземном слое его содержание выросло в два раза. Это говорит о том, что фотохимическая генерация озона происходила в самых нижних приземных слоях воздуха, куда поступали озонобразующие соединения с подстилающей поверхности. В послеполуденное время генерация озона сместилась к верхней границе пограничного слоя, куда начали поступать газы-предшественники в системе турбулентного обмена.

Различие между послеполуднем и вечером подтверждает этот вывод. Данный профиль показывает, что турбулентный перенос не обеспечивает максимум приземной концентрации в суточном ходе, а лишь выравнивает концентрации примеси в пограничном слое. Разница полдень–вечер в нижних слоях максимальна, что говорит о преобладающем механизме стока озона на подстилающую поверхность в этот период.

Из проведенного анализа потоков озона следует, что в период активной фотохимической генерации озона в пограничном слое атмосферы наблюдается заметный суточный ход, который определяется его

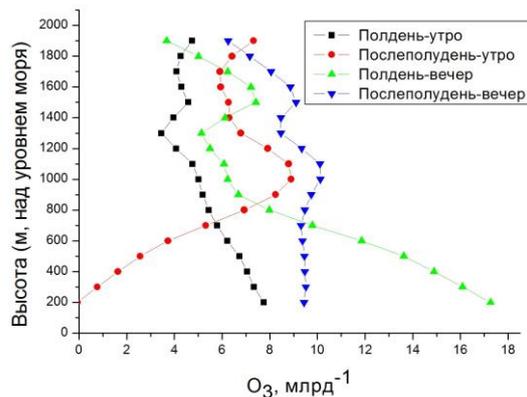


Рис. 2. Разница концентраций озона в разное время суток.

образованием *in situ*. При этом в период активного турбулентного обмена в верхней части пограничного слоя наблюдается нисходящий поток за счет вовлечения озона из свободной атмосферы, а в нижней его части – выраженный восходящий поток, который обусловлен генерацией озона из газопредшественников.

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 № 11.519.11.5009, № 11.518..11.7045, № 14.515.11.0030 и № 8325.

#### *СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ*

Антохин П.Н., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д. и др. Применение самолета Ан-2 для исследования состава воздуха в пограничном слое атмосферы // *Оптика атмосферы и океана*. 2012. Т. 25, № 8. С. 714–720.

Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К. и др. Организация мониторинга парниковых и окисляющих атмосферных компонент над территорией Сибири и некоторые его результаты. 1. Газовый состав // *Там же*. 2006. Т. 19, № 11. С. 948–955.

Балин Ю.С., Ершов А.Д. Вертикальная структура аэрозольных полей пограничного слоя атмосферы по данным лазерного зондирования // *Там же*. 1999. Т. 12, № 7. С. 616–623.

Белан Б.Д. Динамика слоя перемешивания по аэрозольным данным // *Там же*. 1994. Т. 7, № 8. С. 1045–1054.

Baklanov A.A., Grisogono B., Bornstein R., et al. The nature, theory, and modeling of atmospheric planetary boundary layers // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 2011. V. 92, N 2. P. 123–128.

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия*