

В.П. Бутуханов, Г.С. Жамсуева, А.С. Заяханов, Ю.Л. Ломухин, Б.З. Цыдыпов

Вертикальное распределение концентрации озона и температуры в приземном слое атмосферы юго-восточного побережья оз. Байкал

Отдел физических проблем при президиуме Бурятского научного центра СО РАН, г. Улан-Удэ

Поступила в редакцию 24.06.2002 г.

Представлены результаты измерения вертикального распределения температуры и концентрации озона в приземном слое атмосферы юго-восточного побережья оз. Байкал. При инверсионном типе стратификации происходит накопление озона над слоем инверсии, а над нижней границей слоя его значительное убывание.

Основным каналом стока озона является его взаимодействие с подстилающей поверхностью (процессы химической и физической сорбции). На важную роль подстилающей поверхности для стока озона указывает, прежде всего, характер вертикального распределения озона в атмосфере – концентрация озона в тропосфере уменьшается по мере приближения к поверхности земли [1]. Отклонения от такого вида вертикального распределения озона объясняются как действием локальных источников и стоков озона, так и стратификацией приземного слоя атмосферы. Однако приведенные в работе [2] исследования показали, что запирающие инверсионные слои в атмосфере, ветер, устойчивость пограничного слоя не играют решающей роли в накоплении озона. В экспериментах, приведенных в работе [1], показано, что максимум приземной концентрации озона устанавливается над слоем инверсии в случае его переноса из более высоких слоев атмосферы (природный источник). При наличии антропогенных источников озона его максимальная концентрация регистрируется под слоем инверсии.

Экспериментальные исследования и анализ динамики вертикального распределения озона, проведенные совместно с изучением метеорологических параметров, могут дать информацию о причинах изменчивости концентрации озона и о природе его поступления в приземный слой атмосферы для каждого конкретного пункта (района).

Для исследования влияния устойчивости атмосферы на распределение озона нами были проведены синхронные измерения концентрации приземного озона и температуры в 12-метровом слое атмосферы на юго-восточном побережье оз. Байкал в летний период (13.07–28.07) 2001 г.

Результаты наблюдений

Пункт наблюдения располагался в п. Боярск на научном полигоне БНЦ СО РАН с координатами: 51°40' с.ш., 103°40' в.д., в 500 м по нормали к бере-

говой линии на высоте около 200 м над уровнем оз. Байкал. Измерения концентрации озона и температуры проводились с использованием метеорологической мачты на открытой площадке с травяным покровом. Высота травяного покрова равнялась приблизительно 50 мм. Зонд с датчиком температуры и тефлоновой трубкой для отбора пробы поднимался по тросу с двухминутной выдержкой на высотах 2, 4, 6, 8, 10 и 12 м, в среднем 4 раза в сутки (утром, днем, вечером, ночью). Максимальная высота 12 м выбрана из условий технических возможностей зондирования приземного слоя атмосферы.

Измерения концентрации O_3 проводились газоанализатором З-02П1 НПО «ОПТЭК». Газоанализатор имеет следующие технические характеристики: диапазон измеряемых концентраций – 1÷1000 мкг/м³; относительная погрешность измерения – 15%; быстродействие – не менее 1 с.

В приборе имеется встроенный калибратор озона, что обеспечивает автоматическую калибровку; аналоговый и цифровой выход. Забор воздуха осуществляется через тефлоновую трубку длиной 13 м.

Температура измерялась прибором Е7-11. В основу прибора положен мостовой метод измерения электрического сопротивления терморезистора (датчик температуры), с последующим пересчетом сопротивления датчика по калибровочному графику в температуру.

Скорость ветра измерялась с помощью метеостанции М-49 на высотах 4, 6 и 8 м. Для анализа использовались осредненные по 2-минутному интервалу измеренные величины концентрации озона и температуры на каждой из приведенных выше высот.

На рис. 1 приведены осредненные кривые вертикального распределения концентрации озона и температуры в зависимости от параметра B – аналог числа Ричардсона, характеризующий турбулентный режим приземного слоя [3]:

$$B = \frac{g}{T_1} \frac{z_3 \Delta T}{C_3^2}, \quad (1)$$

где $\Delta T = T_2 - T_1$, T_1 – температура на высоте z_1 , T_2 – температура на высоте z_2 ; C_3 – скорость ветра на высоте z_3 , $z_1 = z_3/2 = 2$ м, $z_2 = 2z_3 = 8$ м, $z_3 = 4$ м; $g = 9,8$ м/с². Величина и знак числа B определяются влиянием стратификации на турбулентный режим.

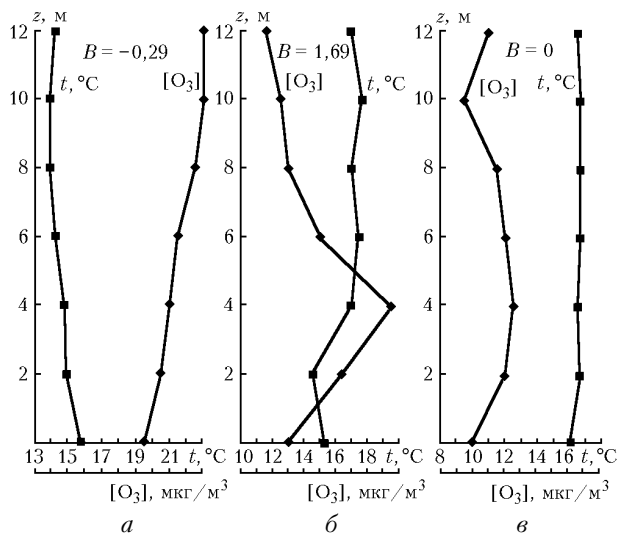


Рис. 1. Вертикальное распределение концентрации озона и температуры в приземном слое атмосферы юго-восточного побережья оз. Байкал (п. Боярск, 13.07–28.07.2001)

Ход кривой вертикального распределения температуры на рис. 1,а является характерным для неустойчивой стратификации, о чем свидетельствует параметр $B = -0,29$. Такой тип стратификации в основном наблюдается в первой половине дня (11–12 ч) с числом случаев 21 за весь период наблюдений. При этом $\Delta[O_3]$ на уровне 10 м составил 3,5 мкг/м³.

При неустойчивой стратификации в утренние часы по мере прогрева подстилающей поверхности начинается развитие конвективных восходящих потоков, которые способствуют усилению турбулентного перемешивания воздушных масс в слое атмосферы от 2 до 10 м. При высоте верхней границы слоя перемешивания, равной 10 м, концентрация O_3 равна 23 мкг/м³, в то время как непосредственно у поверхности земли $[O_3]$ уменьшилась незначительно (до 19 мкг/м³). Таким образом, конвективный поток при неустойчивой стратификации создает благоприятные условия для турбулентного обмена молекул O_3 и выравнивания его концентрации по высоте. Необходимо отметить, что указанная стратификация сопровождалась высокой солнечной инсоляцией, способствующей генерации озона.

На рис. 1,б кривая вертикального распределения температуры характеризует инверсионный тип стратификации в сочетании со штилем в нижнем приземном слое атмосферы. При этом параметр B равен 1,69, что указывает на сильную устойчивость этого слоя. В слое инверсии турбулентность и вертикальные движения ослаблены или полностью исчезают, в случае особо сильной инверсии образуется так называемый «запирающий» слой. Значения скорости ветра, измеренной на высотах 4 и 8 м, были равны 2 и 1 м/с соответственно. Данный тип стратификации в 14 случаях за

период наблюдений установлен в вечернее время суток (21–22 ч) при температуре окружающего воздуха +17 °С и юго-восточном направлении ветра.

В работе [4] показано, что повторяемость приземных инверсий на южном побережье оз. Байкал для летнего периода составляет 44%, которые большей частью отмечаются в вечерние и ночные часы и связаны с выхолаживанием подстилающей поверхности.

Кроме того, необходимо учесть влияние бризов, которые на побережье такого крупного водоема, как оз. Байкал, довольно часты. По данным работы [5] повторяемость возникновения и развития бризовой циркуляции и других местных периодических ветров в летний период достигает 50–70%.

В вечерние и ночные часы при отсутствии генерации озона происходит его разрушение в темновых реакциях с окислами азота и другими газовыми примесями. При сравнении кривых распределения $[O_3]$ на рис. 1,а,б видно, что концентрация озона на высоте $z = 12$ м в вечернее время (21–22 ч) в 2 раза меньше, чем $[O_3]$ в период его интенсивной генерации (см. рис. 1,а).

С другой стороны, при взаимодействии местных циркуляций с общим потоком в этот период времени часто образуются штилевые слои, где скорость ветра уменьшается до 0–1 м/с. В этих слоях атмосферные примеси под влиянием диффузионных процессов концентрируются [5]. На рис. 1,б видно, что концентрация озона с высоты 12 м в этом слое начинает плавно увеличиваться, достигая на высоте $z = 6$ м $\Delta[O_3] = 4$ мкг/м³ при скорости ветра 1 м/с. В дальнейшем, попадая в потоки местных ветров, озон переносится на акваторию озера, где происходит процесс его накопления. При развитии берегового бриза в его противопотоке холодные воздушные массы с накопленным озоном поступают в приземный слой пункта наблюдения. В результате на побережье образуется внутренний слой, в пределах которого воздух оказывается более холодным, чем над ним. Температура воздуха с высотой здесь падает, а на верхней границе слоя может возрастать. Таким образом, возникает приземная инверсия, высота и интенсивность которой зависят от времени суток, расстояния от берега и разности температуры поверхности воды и суши. Нижняя граница такой инверсии располагается на сравнительно небольших высотах [6]. Для оценки высоты слоя инверсии на юго-восточном побережье оз. Байкал была использована эмпирическая формула [7]:

$$H = \frac{u_*}{u} \sqrt{\frac{x \Delta T}{\partial T / \partial z}}, \quad (2)$$

где $u = 2$ м/с – средняя скорость ветра, $u_* = 0,3$ м/с – динамическая скорость или скорость трения; $x = 500$ м – расстояние от берега до пункта наблюдения; $\Delta T = -2$ °С – разность температур «вода – суша», $\partial T / \partial z = -1,1$ °С/м – средний градиент температуры воздуха на побережье.

Подставив значения параметров в выражение (2), мы получили высоту слоя $H \approx 4,5$ м. При сравнении

расчетной H и полученной при эксперименте видно, что небольшое отклонение этих высот (см. рис. 1,б) вызвано влиянием приближенного значения параметра скорости трения u_* . Для более корректного определения H необходимо измерять эту скорость.

В инверсионном слое процесс накопления озона усиливается. Концентрация озона достигает максимума на $z = 4$ м. При этом $\Delta[\text{O}_3] = 8$ мкг/м³. Ниже основания инверсии при $z < 4$ м с усилением турбулентной диффузии с подстилающей поверхности происходят уменьшение концентрации озона и его сток.

При нейтральной стратификации, как известно, температура с высотой изменяется адиабатически; при этом параметр $B = 0$. С учетом небольшой вертикальной протяженности приземного слоя к нейтральной стратификации можно отнести особый случай устойчивой стратификации – изотермию. При изотермии, так же как и при инверсионной стратификации, всякие вертикальные потоки сильно ослаблены. Кривая распределения температуры, представленная на рис. 1,в, практически не меняется с высотой, также незначительна $\Delta[\text{O}_3]$, среднее значение его равно 1,7 мкг/м³. Наблюдается некоторое уменьшение $[\text{O}_3]$ на высоте 10 м, очевидно, это объясняется влиянием расположенного вблизи от пункта наблюдения лесного массива, который является эффективной поверхностью для стока озона. Средняя высота деревьев примерно соответствует высоте отбора проб, на которой наблюдается отклонение концентрации озона. Для исследования влияния леса на изменчивость озона необходимо проведение дальнейших наблюдений.

Таким образом, за летний период наблюдений вертикального распределения $[\text{O}_3]$ и температуры в приземном слое атмосферы на юго-восточном побережье оз. Байкал нами были получены три типа стратификации и оценено их влияние на вертикальное распределение озона. В дневное время концентрация

озона на высоте 10 м (см. рис. 1,а) в силу значительного турбулентного перемешивания выше более чем в 2 раза $[\text{O}_3]$ при других стратификациях. Необходимо отметить, что типы стратификации на рис. 1,а,в согласуются с теоретическими и экспериментальными данными некоторых исследований [7, 8]. В случае инверсии показано, что «запирающие» слои в атмосфере побережья оз. Байкал играют существенную роль в накоплении озона в этом слое.

Для детального исследования влияния устойчивости атмосферы на вертикальное распределение озона необходимо проведение долговременных наблюдений с использованием современных средств вертикального зондирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 01-05-97240).

1. Ровинский Ф.Я., Егоров В.И. Озон, окислы азота и серы в нижней атмосфере. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 184 с.
2. Красненко Н.П., Фурсов М.Г. Об исследовании взаимосвязи метеорологических параметров пограничного слоя атмосферы и концентрации озона // Оптика атмосф. и океана. 1994. Т. 7. № 11–12. С. 1611–1613.
3. Матвеев А.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 639 с.
4. Региональный мониторинг состояния озера Байкал / Под ред. чл.-кор. АН СССР Ю.А. Израэля и канд. физ.-мат. наук Ю.А. Анохина. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 303 с.
5. Власенко В.В. Климат и растительность южного Прибайкалья: Сб. науч. тр. Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1989. С. 32–43.
6. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 272 с.
7. Reynor G.S. Formation and characteristics of coastal interval boundary layers during on shore flows // Boundary-Layer Meteorol. 1979. V. 16. N 4. P. 487–514.
8. Yegorov V.I., Rovinsky F.Ya. Background pollution of surface atmospheric layer by ozone over European territory of the USSR // J. Ecol. Chem. 1993. N 1. P. 41–45.

V.P. Butukhanov, G.S. Zhamsueva, A.S. Zayakhanov, Yu.L. Lomukhin, B.Z. Tsydyrov. Vertical distribution of ozone concentration and temperature in the ground atmospheric layer of south-eastern coast of Lake Baikal.

The results of measurement of vertical distributions of air temperature and ozone concentration in the ground layer of the atmosphere of south-east coast of Lake Baikal are presented. The accumulation of ozone above the inversion layer and its considerable increase under lower boundary of the layer take place at the inversion type of stratification.