

Вертикальные потоки озона в приземном слое атмосферы вблизи береговой зоны оз. Байкал

В.П. Бутуханов (vbut1951@gmail.com), ИФМ СО РАН, г. Улан-Удэ

Экспериментальное определение вертикальных потоков озона в приземном и приземном слоях атмосферы является важным элементом моделирования для параметризации стока и сухого осаждения озона на земную поверхность [1, 2].

Принято считать, что процесс сухого осаждения включает перенос озона к поверхности турбулентными вихрями, молекулярную диффузию через квазиламинарный слой непосредственно у поверхности толщиной около 1 см и адсорбцию или абсорбцию на земной поверхности (почва, вода). В свою очередь определение стока озона и оксидов азота на поверхность водоемов важно с точки зрения возможного влияния этих газов, как сильных окислителей на химию поверхностного микрослоя.

В настоящей работе по результатам синхронных измерений концентрации озона [O_3] и метеопараметров получены данные о вертикальных потоках озона в приземном слое атмосферы юго-восточного побережья оз. Байкал, в летний период. В условиях волнообразования оценена скорость сухого осаждения O_3 .

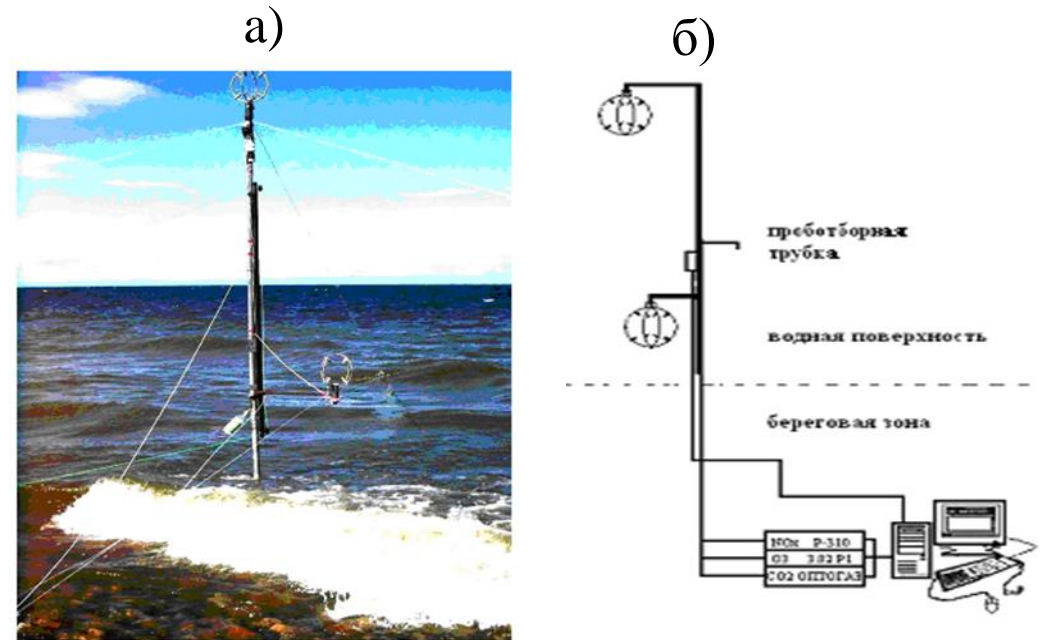
б)

Условия и методика измерений

Измерительный пункт располагался на юго-восточном побережье оз. Байкал, в п. Боярский с координатами $51^{\circ}50'$ с.ш., $106^{\circ}05'$ в.д., на открытой галисто-песчаной поверхности в 2-ух метрах от уреза воды.

Метеорологические датчики и устройство пробоотбора, установленные на мачте на высотах 4 и 1 м от поверхности воды, были удалены от берега в сторону озера на расстояние 10 м (рис. 1 а). Вертикальное перемещение и позиционирование пробоотборного устройства на высотах от 1 до 4 м осуществлялось с берега при помощи подъемного механизма.

Измерения метеопараметров и концентрации озона проводились при помощи измерительной системы, включающей в себя ультразвуковую метеостанцию АМК-02Б и многоканальный измерительный комплекс характеристик газовых примесей, в которую входит хемилюминесцентный газоанализатор озона (рис. 1 б).



Технические характеристики газоанализатора озона 3-02.П1: диапазон измеряемых концентраций – 0 - 1000 $\text{мкг}/\text{м}^3$; относительная погрешность измерения – 15%; предел обнаружения не более 1 $\text{мкг}/\text{м}^3$.

При длине и диаметре пробоотборной трубки равными $l = 12$ м, $d = 6$ мм, соответственно, и интенсивности прокачки воздуха 2 л/мин скорость движения воздуха в системе пробоотбора оценивается величиной около 30 см/сек. Тогда за оценку верхней границы частоты пульсации концентрации озона следует принять величину $\approx 0,024$ Гц. Из этой оценки следует, что высокочастотные колебания с периодом 40 сек ограничены длиной трубки. Нижняя граница при прочих равных условиях будет определяться периодом осреднения данных измерения. Для исследования мелкомасштабной турбулентности в приземном и приводном слое с периодом колебания близкими к 10 минутам обоснованным является выбор времени осреднения с данным периодом.

Тогда, при времени осреднения порядка 10 мин, при относительно долгопериодных измерениях концентрации озона (от суток и более) на разных высотах, в пределах приземного слоя, можно оценивать их потоки со случайной погрешностью не более 25%.

Параметры ветровой и температурной турбулентности вычислялись по данным измерений компонент скорости ветра и температуры воздуха в приводном слое атмосферы по алгоритмам программы АМК-02Б [4]. Погрешности измерения пульсаций скорости горизонтальной и вертикальной составляющей ветра равны $\pm (0,1 + 0,02v)$ и $\pm (0,1 + 0,02w)$. Погрешность измерения абсолютной температуры составила $\pm 0,4^\circ\text{C}$.

Для оценки вертикального потока озона вблизи поверхности применялись известные методы измерения. 1). Корреляционный метод, основанный на вариациях вертикальной компоненты скорости ветра и концентрации озона. При использовании этого метода средний поток примеси определяется равенством

$$\langle wO_3 \rangle = \langle w'O_3' \rangle = \langle w \rangle \langle O_3 \rangle, \quad (1)$$

где $\langle w'O_3' \rangle$ - турбулентный поток озона, $\text{м}^2/\text{с}$, w , $\text{м}/\text{с}$ – вертикальная компонента скорости ветра, O_3 - концентрация озона, штрихом обозначены вариации, $\langle \rangle$ - символ осреднения.

2) Метод определения турбулентного потока озона, основанный на измерениях разности концентрации озона на 2-ух уровнях высот от поверхности z_1 и z_2 [3]. В этом случае турбулентный поток озона оценивается выражением $k\Delta O_3/\Delta z$, где k , м²/с – коэффициент турбулентности в слое между z_1 и z_2 , ΔO_3 разность концентраций озона на z_2 и z_1 , $\Delta z = z_2 - z_1$. Коэффициент турбулентности на высотах z_1 и z_2 оценивается из теории подобия Монина-Обухова.

Для оценки турбулентного потока озона по второму методу в приводном слое атмосферы оз. Байкал вблизи береговой линии проводились круглосуточные измерения $[O_3]$ (символ $[]$ означает концентрацию газовых примесей), поочередно, на высотах $z = 1$ м и 4 м с экспозицией на каждой высоте по 10 мин в течение 1 ч. Измерения и запись $[O_3]$ осуществлялись синхронно с метеопараметрами и непрерывно по командам IBM PC с периодом квантования 1 с, с последующим осреднением за 10 мин.

Сравнение турбулентных потоков определенных по методу 1 и 2 выявило существенные различия их значений. Необходимость учета коэффициентов турбулентности при оценке потока по методу 2 иногда приводит к занижению потока до 30% по сравнению с первым методом. Вероятной причиной приведенных различий является большой разброс и неопределенность значений k_1 за счет усиления флуктуаций плотности воздуха, вызванной неоднородностью подстилающей поверхности при волнообразовании. В отсутствие волн различия потоков незначительны.

Условия измерения в период наблюдения отличались неоднородностью атмосферных процессов. Смена барического поля с 713 мм.рт.ст. до 721 мм.рт.ст. сопровождалась прохождением атмосферных фронтов с северо-западного направления. При этом наблюдалось похолодание до 8-9°C в дневные часы, усиление скорости горизонтального ветра до 15 м/с и выпадение осадков.

В малооблачные, солнечные дни при скорости ветра $V = 2-3$ м/с воздух прогревался до 20-22°C. Устойчивость атмосферы изменялась в среднем, за указанные выше сроки наблюдения, от умеренно неустойчивой в дневные часы до сильно устойчивой ночью и в предутренние часы (градиентное число Ричардсона $Ri = -0,1 - 0,3$).

Оценка скорости сухого осаждения озона на водную поверхность

Для количественной оценки стока озона на подстилающую поверхность используется скорость его осаждения, которую можно непосредственно определить из граничного условия баланса потоков озона на подстилающую поверхность $-\langle w'O_3' \rangle = V_{o\partial}[O_3]$, где $\langle w'O_3' \rangle$, $\text{мкг/м}^2\text{с}$ – турбулентный поток в слое $h = 3$ м, $V_{o\partial}$, м/с – скорость сухого осаждения, $[O_3]$, мкг/м^3 – концентрация озона осредненная по 10 минутным измерениям на высоте $z_1 = 1$ м.

Тогда скорость осаждения озона на водную поверхность из условия баланса потоков будет равна

$$V_{o\partial} = - \langle w'O_3' \rangle / [O_3] \quad (2)$$

Оценка и анализ скорости осаждения проводились на основе измеренных экспериментальных данных потока и концентрации озона, характеристик турбулентности, осредненных за 10 минутный интервал времени в слое трения $h = 3$ м.

В условиях волнообразования и развитии поверхностных волн на Байкале, которые происходят ежедневно, была обнаружена значительная изменчивость величины скорости горизонтального ветра на $z = 4$ м и $z = 1$ м от уровня поверхности воды. В отдельные периоды волнения при высоких значениях ΔV установлено, что указанные процессы задерживают сток озона на водную поверхность, с уменьшением ΔV и с увеличением скорости ветра в слое $h = 3$ м в условиях развитого волнения происходит уменьшение концентрации озона до своего минимального значения за время измерения.

Корреляционный анализ показал, что наиболее заметное влияние на изменчивость концентрации озона и его скорости осаждения в условиях волнообразования, кроме ветровых характеристик, оказывают скорость трения u_* , поток импульса τ и параметры волн. Поэтому для учета влияния этих параметров на сухое осаждение озона в слое $h = 3$ м была получена приближенная зависимость скорости осаждения V_o от параметров приводного слоя при граничном условии, описываемого выражением $(\partial U / \partial z)_{z=h} = u_* / kh$, где u_* скорость трения, $k = 0,4$ – постоянная Кармана.

Сопротивление R при взволнованной водной поверхности рассматривается, как сопротивление элементов шероховатости с учетом параметров приводного слоя атмосферы. Выражение для сопротивления можно представить в виде $R \approx z_0 / \langle h \rangle ku_*$, (3)

где $z_0 = z/\exp[k/C_d 1/2(z)]$ – параметр шероховатости, C_d – коэффициент сопротивления потоку, $\langle h \rangle$ – среднеквадратическая высота волн, u_* – скорость трения, k – постоянная Кармана. Параметры C_d и u_* вычисляются по формулам атмосферной турбулентности программно по измеренным первичным данным ветровых характеристик. На практике наиболее распространено характеризовать приводный слой таким параметром, как нормированная шероховатость взволнованной поверхности $z_0' \equiv z_0/\langle h \rangle$ [7].

Сложность интерпретации параметров шероховатости, заключающаяся в большой изменчивости и разбросе их величин в пределах нескольких порядков в зависимости от скорости ветра и скорости трения u_* даже в узком диапазоне изменения их значений [5], заставляет оценивать эти параметры через возраст волн (степень развития ветрового волнения) $A = c_p^*/u_*$ [8], где c_p^* – скорость распространения ветровых волн. При $z_0'/\langle h \rangle \sim c_p^*/u_*$ [7] выражение для скорости сухого осаждения в первом приближении можно записать в виде $V_{0M} \approx \frac{ku_*}{c_p^*/u_*}$ (4)

Скорость распространения волн, возникающих на поверхностях раздела сред с различной температурой и скоростью движения воздушных потоков можно рассчитать по формуле Гельмгольца из условия устойчивости волн [9]

$$c_p^*/u_* = \frac{T_2 V_1 + T_1 V_2}{T_1 + T_2} \approx \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (5)$$

где T_2 и T_1 – температура воздуха вблизи поверхности раздела соответственно верхнего и нижнего потоков, V_2 и V_1 – скорости воздушных потоков на $z = 4$ м и 1 м, соответственно. Под устойчивостью волн здесь понимается безотрывное обтекание воздушным потоком неоднородностей подстилающей поверхности. Увеличение разности $|\Delta V|$ способствует росту неустойчивости волн, за счет возникновения условий срыва потока с ростом неоднородностей подстилающей поверхности. Анализ волнообразования и его развития в пункте наблюдения, связи параметров волн со скоростью сухого осаждения озона позволил интерпретировать некоторые особенности их зависимостей.

Вариации скорости ветра в слое $h = 3$ м в начальные моменты времени прихода поверхностных волн усиливают перемешивание воздушных масс и приводят к некоторому росту содержания озона на $z_2 = 4$ м. При этом максимальный турбулентный поток озона направлен вниз к поверхности волн (рис. 4).

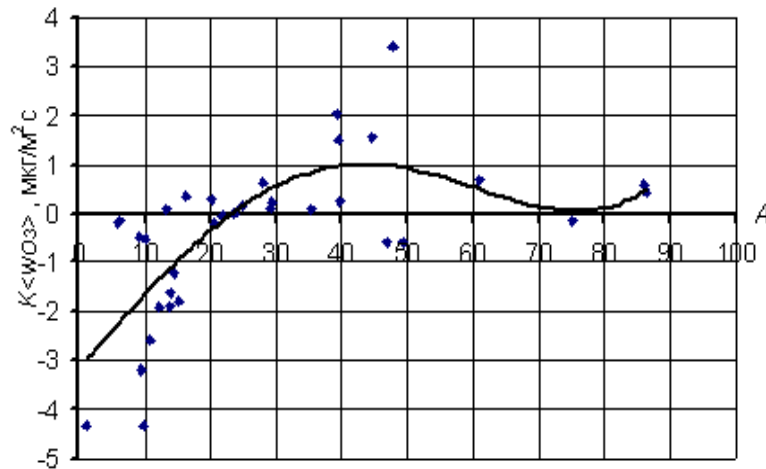


Рис.2. Зависимость турбулентного потока озона от степени развития волн A.

В дальнейшем рост высоты волн и их взаимодействие с ветром резко увеличивает скорость воздушного потока над гребнем волн за счет разности сил нормального давления с наветренной и подветренной стороны препятствия. Возникшие силы трения при отрицательном ΔV создают поток импульса от волн в атмосферу, препятствующий стоку воздушных масс на водную поверхность. В результате этих процессов, с уменьшением турбулентного потока озона в слое $h = 3$ м, также происходит задержка стока озона и некоторое накопление на $z_2 = 4$ м за счет его притока с верхних слоев атмосферы.

Резкое уменьшение ΔV и скорости ветра практически до нулевого значения в слое $h = 3$ м, обусловленное процессами вихреобразования на поверхности гребней волн и переноса вихрей в вышележащие слои, приводит к резкому увеличению скорости осаждения озона на водную поверхность за счет инерционных сил. Ее максимальное значение $V_{O_3} = 4,1$ см/с полученное из (2) свидетельствует о значительном превышении ее средней величины равной 0,75 см/с за указанный период наблюдения (рис. 5).

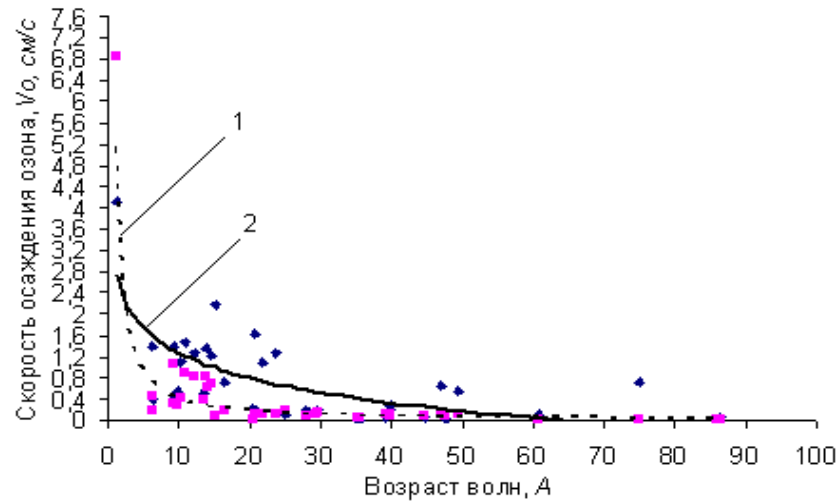


Рис. 5. Зависимость скорости осаждения озона от степени развития волн A в приводном слое атмосферы Байкала. 1 - кривая значений V_o , вычисленная по приближенной эмпирической модели (4), 2 - скорость осаждения $V_{oэ}$, полученная из (2).

Сравнение рядов $V_{oэ}$ и V_o , полученных из (2) и (4) в условиях волнообразования показало тесную связь между вариациями $\langle V_{oэ} \rangle$ и $\langle V_o \rangle$. Значимый коэффициент корреляции между ними равен 0,785 со среднеквадратической ошибкой 0,214 при доверительной вероятности, равной 0,95. При этом существующее различие их средних значений $\langle V_{oэ} \rangle = 0,753$ см/с и $\langle V_o \rangle = 0,576$ см/с говорит о допустимом пределе случайной погрешности измерения.

Заключение

Прямой метод измерения пульсаций основных метеорологических параметров и измерения концентраций газовых примесей на высотах z_1 и z_2 позволили оценить величину скорости сухого осаждения озона на водную поверхность Байкала.

В условиях волнообразования, в период его активного развития установлена высокая скорость сухого осаждения озона. Наиболее вероятной причиной являются процессы вихреобразования и срыв вихрей с поверхности гребней волн при обтекании их воздушным потоком. В результате вертикального переноса вихрей происходит резкое торможение потоков в слое измерения и увеличение скорости осаждения за счет инерционных сил. Это – важный результат, т.к. он обосновывает возможность учета динамического приводного слоя в региональных моделях вертикального распределения озона, где используются осредненные характеристики сухого осаждения.

Список литературы

1. *Aldaz F.* Flux measurements of atmospheric ozone over land and water / *J. Geophys. Res.* - 1985. - V.D3, №90. - P.5547-5566.
2. *Еланский Н.Ф., Копров Б.М., Соколов Д.Ю., Тиме Н.С.* Турбулентный поток озона над степью / *Физика атмосферы и океана.* - Изв. РАН, 1995. - Т.31, №1. - С.109-114.
3. *Ровинский Ф.Я., Егоров В.И.* Озон, окислы азота и серы в нижней атмосфере. - Л.: Гидрометеиздат, 1986. - 184 с.
4. *Богусевич А.Я.* Ультразвуковые методы оценивания метеорологических и турбулентных параметров атмосферы / *Оптика атмосферы и океана.* - 1999. - Т.12, №2. - С.170-175.
5. *Китайгородский С.А.* Физика взаимодействия атмосферы и океана. - Л.: Гидрометеиздат, 1970. - 283 с.
6. *Заславский М.М.* О параметрическом описании приводного слоя атмосферы / *Физика атмосферы и океана.* - Изв. РАН, 1995. - Т.31, №5. - С.607-615.
7. *Полников В.Г., Волков Ю.В., Погарский Ф.А.* Интерпретация изменчивости характеристик приводного слоя атмосферы с помощью численной модели / *Физика атмосферы и океана.* - Изв. РАН, 2003. - Т.39, №3. - С.410-421.
8. *Janssen P.E.A.M.* Quazi-liner theory of wind wave generation applied to wind wave forecasting / *J. Phys. Oceanogr.* - 1991. - V. 21. - P. 1389-1405.