

## ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 551.510.42

В.Л. Потемкин, В.Л. Макухин

# Исследование динамики малых газовых примесей в атмосфере Байкальского региона

*Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск*

Поступила в редакцию 12.02.2007 г.

Выполнен анализ данных, полученных при измерении с помощью газоанализатора концентраций оксидов азота за период 2005–2006 гг. в окрестностях г. Иркутска, в сопоставлении с метеорологическими условиями за этот же период. Выявлены 2 типа суточного хода. Значения концентраций диоксидов серы и азота в приводном слое оз. Байкал изменялись от 1 до 10 мкг/м<sup>3</sup>. Максимальные значения концентрации SO<sub>2</sub> отмечены в районе Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (Южный Байкал) под шлейфом.

Проведено сравнение рассчитанных и измеренных значений концентраций диоксида серы, оксидов азота, получено их удовлетворительное количественное соответствие.

### Введение

Диоксид серы и оксиды азота относятся к основным загрязнителям атмосферы, оказывающим вредное воздействие на здоровье человека и окружающую среду. Участвуя в фотохимических реакциях с кислородом и углеводородами, эти вещества генерируют другие загрязнители, такие как пероксиацетилнитраты, озон и др. Важно установить, как будут распространяться эти примеси в атмосфере не только вокруг крупных промышленных центров, но и над фоновыми районами, одним из которых является регион оз. Байкал.

В последние годы организуются экспедиционные измерения концентраций SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, NO в регионе оз. Байкал, интересные результаты приведены в работах [1–3]. Продолжается совершенствование математических моделей распространения и трансформации примесей, достаточно полный обзор успехов и достижений в этой области дан в работе [4]. Кроме того, выполнены исследования распространения и трансформации аэрозольных частиц от пяти крупных источников Приангарья и Южного Прибайкалья в регионе оз. Байкал с учетом кинетических процессов конденсации, испарения и коагуляции [5]. Отметим, что шаг сетки по горизонтальным координатам в работе [5] был равен 10 км.

### 1. Методы исследования

Измерения оксидов азота в 2005–2006 гг. проводились с помощью хемилюминесцентного газоанализатора 310А в районе Иркутского академгородка, в долине р. Ангара на левом ее берегу. Подобные приборы использовались для измерения концентраций диоксида и оксида азота и диоксида серы над акваторией оз. Байкал за период с 9 по 23 июня 2006 г. во время рейса научно-исследовательского судна «Г.Ю. Верещагин» (рис. 1).



Рис. 1. Маршрут НИС «Г.Ю. Верещагин» в период экспедиционных исследований 9–23 июня 2006 г. по акватории Байкала

Измерения и запись результатов велись непрерывно. Паспортная ошибка измерений составляла 20%, чувствительность — менее 1 мкг/м<sup>3</sup>. Забор проб осуществлялся на высоте 3 м над поверхностью воды во избежание возможного влияния дизельных выхлопов судна.

С целью исследования процессов распространения и трансформации аэрозолей и газовых примесей в регионе оз. Байкал использовалась нелинейная нестационарная пространственная математическая модель эйлерова типа [6]. Модель применялась ранее при изучении процессов распространения и трансформации аэрозолей и газовых компонентов, выбрасываемых промышленными предприятиями, расположенными в регионе Южного Байкала и долины Ангары [7, 8]. Проведенное сравнение результатов численных расчетов с данными инструментальных измерений показало их удовлетворительное количественное соответствие [9].

## 2. Результаты измерений и численных экспериментов

С помощью хемилюминесцентного газоанализатора исследованы суточные изменения концентраций оксидов азота за период 2005–2006 гг. в Иркутске. С использованием построения корреляционной матрицы выявлены 2 типа суточного хода концентраций оксидов азота (рис. 2), характерные для городских условий с постоянно меняющимися интенсивными транспортными потоками.

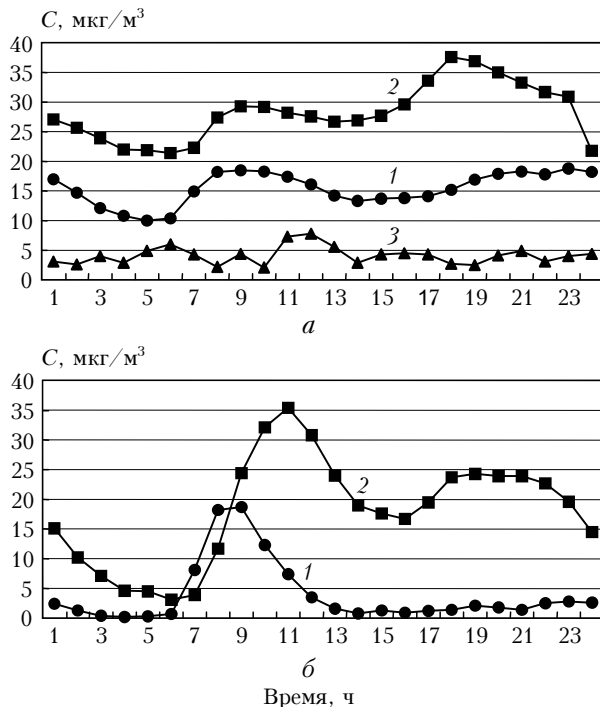


Рис. 2. Распределение концентраций диоксида азота (а) и оксида азота (б), характерное для теплого (1 – май–сентябрь) и холодного (2 – октябрь–февраль) периодов года, а также за период наблюдений на Байкале (3 – июнь 2006 г.)

В теплый период года в суточном ходе концентрации диоксида азота преобладают 2 минимума и 2 максимума (рис. 2, а). Максимум концентрации оксида азота наблюдается утром, в 8–9 ч; эти значения примерно равны соответствующим значениям концентрации NO<sub>2</sub> в это же время. В остальное время суток значения концентрации NO значительно меньше максимальных примерно на порядок. Отметим, что значения рассчитанных коэффициентов корреляции между усредненным за период май – сентябрь суточным распределением концентрации диоксида азота и усредненным суточным распределением за каждый из этих месяцев по отдельности превышают 0,8, а концентрации оксида азота – 0,9.

Для холодного периода года (октябрь–февраль) в суточном ходе концентрации диоксида азота наблюдаются 3 максимума и 3 минимума, а в суточном ходе концентрации оксида азота – 2 максимума и 2 минимума (рис. 2, б). Значения рассчитанных

коэффициентов корреляции за период октябрь – февраль для NO<sub>2</sub> превышают 0,85, для NO – 0,8. В основном суточный ход концентраций газов в Иркутске соответствует суточному ходу в других городах [10, 11].

Утренний и вечерний максимумы концентрации диоксида азота приходятся на периоды наиболее интенсивной работы автотранспорта, дневной и более глубокий ночной минимумы – на периоды малой интенсивности его работы. Локальный максимум NO<sub>2</sub> в 1 ч в холодный период года может быть связан с формированием приземной инверсии, которая способствует накоплению диоксида азота при окислении NO до NO<sub>2</sub> [11]. Суточный ход концентрации диоксида азота в холодный период года в Иркутске качественно совпадает с суточным ходом концентрации NO<sub>2</sub> в пригородной зоне г. Сарваш (Венгрия) [12].

В продолжение исследований процессов распространения и трансформации оксидов азота и диоксида серы в приземном слое оз. Байкал был выполнен анализ концентраций NO<sub>2</sub>, NO и SO<sub>2</sub>. Измерения проводились летом 2005 г. и в июне 2006 г. на научно-исследовательском судне «Г.Ю. Верещагин» на всей акватории озера. Результаты измерений свидетельствуют о том, что значения концентраций оксидов азота в южной и средней котловинах озера в 2006 г. незначительно отличаются от значений концентраций соответствующих ингредиентов лета 2005 г. Во время движения судна значения концентраций диоксида азота обычно не превышали 10 мг/м<sup>3</sup>, оксида азота были менее 1 мг/м<sup>3</sup> и диоксида серы не превышали 5 мг/м<sup>3</sup>. При подходе к берегу, когда сказывалось влияние дизельных выхлопов судна и выбросов береговых источников, значения концентраций оксидов азота возрастали на 1–2 порядка: NO<sub>2</sub> приближались к 300 мг/м<sup>3</sup> и NO превышали 200 мг/м<sup>3</sup>. Так как в июне 2006 г. лесных пожаров вблизи Байкала не наблюдалось (в отличие от периода экспедиционных исследований 2005 г.), значения концентраций оксидов азота в северной котловине озера незначительно отличались от соответствующих значений в средней и южной котловинах. Максимальные значения концентрации SO<sub>2</sub> отмечены в районе Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (БЦБК) на расстоянии 1–4 км под шлейфом, они достигали 35 мг/м<sup>3</sup>.

Результаты инструментальных исследований были дополнены расчетами по математической модели распространения и трансформации примесей. Численное интегрирование проводилось в области площадью 32×6 км и высотой 3 км над поверхностью оз. Байкал. Шаги по времени и горизонтали составляли соответственно 20 с и 100 м; шаг по вертикали задавался следующим образом: до высоты 400 м он равнялся 50 м, выше 400 м до высоты 1400 м – 500 м, до высоты 2000 м – 600 м, далее – 1000 м. Начальная концентрация молекулярного азота N<sub>2</sub> принималась равной 0,93 кг/м<sup>3</sup>, молекулярного кислорода O<sub>2</sub> – 0,297 кг/м<sup>3</sup>, водяного пара H<sub>2</sub>O – 7 · 10<sup>-4</sup> кг/м<sup>3</sup>, молекулярного водорода H<sub>2</sub> – 10<sup>-7</sup> кг/м<sup>3</sup>. Коэффициенты турбулентной диффузии рассчитывались с использованием соотношений полуэмпирической

теории турбулентности. Блок химических реакций, учитывавшихся при численных экспериментах, представлен в работе [6]. В отличие от [6] расчеты проводились со значением константы скорости реакции R27 (фотохимическая диссоциация диоксида азота), равным  $7,8 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ .

Для оценки значения коэффициента турбулентной диффузии при максимальных измеренных концентрациях диоксида серы под шлейфом выбросов БЦБК была проведена серия численных экспериментов. Коэффициент турбулентной диффузии примеси трудно определить прямыми измерениями. Сочетание расчетов по математической модели и результатов измерений позволило с достаточной точностью оценить значение этой важной характеристики атмосферы.

На рис. 3 приведены распределения рассчитанных значений концентраций диоксида серы в районе БЦБК при западном ветре со скоростью 2 м/с и различных значениях горизонтальной составляющей коэффициента турбулентной диффузии примеси в приземном подслое.

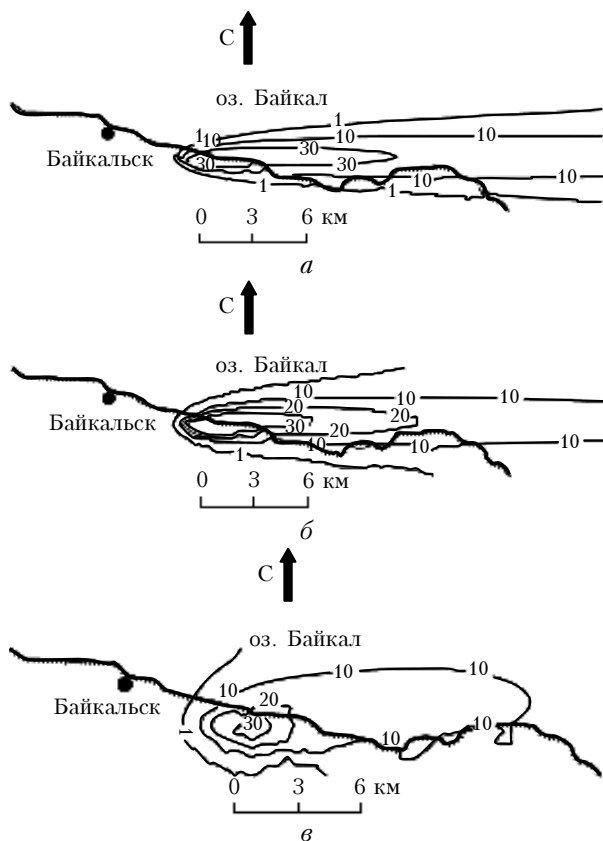


Рис. 3. Изолинии рассчитанных значений концентраций диоксида серы в районе БЦБК при различных величинах горизонтальной составляющей коэффициента турбулентной диффузии примеси в приземном подслое  $K_x = K_y$ : а –  $K_x = 50$ ; б –  $100$ ; в –  $500 \text{ м}^2/\text{с}$

Значения метеорологических характеристик при расчетах соответствовали наблюдавшимся при экспериментальных исследованиях 12 июня 2006 г. в районе БЦБК. Результаты сравнения рассчитанных и измеренных значений концентраций диоксида серы приведены в таблице.

Значения концентраций диоксида серы в приземном слое оз. Байкал

Номер пункта измерений	Концентрации, мкг/м <sup>3</sup>			
	измеренные	рассчитанные при $K_x, \text{ м}^2/\text{с}$		
		50	100	500
1	30	32	28	16
2	31	33	32	20
3	35	57	34	19

Таким образом, результаты численных экспериментов показали, что величина горизонтальной составляющей коэффициента турбулентности 12 июня 2006 г. в районе БЦБК составляла  $100 \text{ м}^2/\text{с}$  (рис. 3, б). Максимальные концентрации отмечены в направлении воздушного потока. Значения концентраций диоксида серы выше  $20 \text{ мкг}/\text{м}^3$  отмечены на расстоянии до 10 км от БЦБК, а выше  $30 \text{ мкг}/\text{м}^3$  – до 6 км. При слабо выраженных турбулентных процессах облако примеси вытянуто вдоль направления ветра. При отчетливо выраженных турбулентных процессах шлейф примесей размывается.

На рис. 3, в приведены изолинии рассчитанных значений концентрации диоксида серы при западном ветре со скоростью 2 м/с и горизонтальной составляющей коэффициента турбулентной диффузии примеси, равной  $500 \text{ м}^2/\text{с}$ . Как видно из рис. 3, получено более гладкое распределение концентраций диоксида серы. Значения концентраций  $\text{SO}_2$ , равные  $30 \text{ мкг}/\text{м}^3$  и более, над озером не зафиксированы. Ось шлейфа ориентирована с запада-юго-запада на восток-северо-восток. При дальнейшем увеличении значения горизонтальной составляющей коэффициента турбулентной диффузии примеси характер распределения диоксида серы и значения концентраций практически не меняются. Таким образом, сравнение измеренных и рассчитанных по модели значений концентраций диоксида азота позволило более точно определить турбулентные характеристики атмосферы, не измеряемые прямыми методами, при этом фактически решалась обратная задача.

## Выводы

При исследовании суточных изменений концентраций оксидов азота за период 2005–2006 гг. в Иркутске выявлены 2 типа суточного хода. Для первого типа (май – сентябрь) суточный ход концентраций диоксида азота характеризуется двумя максимумами и двумя минимумами, оксида азота – одним максимумом и одним минимумом. Для холодного периода года в суточном ходе концентрации диоксида азота преобладает распределение, характеризующееся тремя максимумами и минимумами, а в суточном ходе концентрации оксида азота – двумя.

Над акваторией оз. Байкал суточный ход концентраций диоксидов серы и азота за период наблюдений летом 2006 г. слабо выражен ( $2\text{--}9 \text{ мкг}/\text{м}^3$ ). Это свидетельствует об отсутствии локальных источников. Наиболее загрязненной является южная часть озера, где сказывается влияние гг. Слюдянка и Байкальск.

Сравнение измеренных и рассчитанных по модели значений концентраций газов позволило оценить горизонтальную составляющую коэффициента турбулентной диффузии над акваторией оз. Байкал в летний период. Ее значения могут составлять 100–200 м<sup>2</sup>/с. Вблизи мощного источника (БЦБК), по измерениям, концентрация диоксида серы достигает 35 мкг/м<sup>3</sup>.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, гранты № 05-05-97232-р и 06-05-64142.

1. Заяханов А.С., Жамсуева Г.С., Бутуханов В.П., Ломухин Ю.Л. Концентрации озона и окислов азота в приземном слое атмосферы озера Байкал // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19. № 7. С. 635–640.
2. Кучменко Е.В., Моложникова Е.В., Маринайте И.И., Зароднюк М.С. Идентификация источников аэрозолей по соотношению индивидуальных концентраций антропогенных загрязнителей // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18. № 5–6. С. 497–501.
3. Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Маринайте И.И., Рассказчикова Т.М., Симоненков Д.В., Фофанов А.В. Исследование химического состава атмосферного аэрозоля в городах Сибири. Ч. 1. Результаты исследования приземного аэрозоля в городах Иркутского промышленного района // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18. № 8. С. 670–677.
4. Кароль И.Л., Киселев А.А. Фотохимические модели атмосферы и их использование в исследованиях озоносферы и климата (обзор) // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2006. Т. 42. № 1. С. 3–34.
5. Алоян А.Е., Пискунов В.Н. Моделирование региональной динамики газовых примесей и аэрозолей // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2005. Т. 41. № 3. С. 328–340.
6. Аргушинцев В.К., Макухин В.Л. Математическое моделирование распространения аэрозолей и газовых примесей в пограничном слое атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 1996. Т. 9. № 6. С. 804–814.
7. Potemkin V.L., Makukhin V.L. Mathematical modeling of processes of aerosol pollution over Lake Baikal // Proc. SPIE. 2004. V. 5743. P. 379–383.
8. Латышева И.В., Макухин В.Л., Потемкин В.Л. Исследование характеристик Азиатского максимума и его влияния на загрязнение атмосферы в регионе оз. Байкал // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18. № 5–6. С. 466–470.
9. Аргушинцев В.К., Куценогий К.П., Макухин В.Л., Оболкин В.А., Потемкин В.Л., Ходжер Т.В. Экспериментальное исследование и численное моделирование аэрозолей и газовых примесей в атмосфере Южного Байкала // Оптика атмосф. и океана. 1997. Т. 10. № 6. С. 598–604.
10. Горчаков Г.И., Семутникова Е.Г., Зоткин Е.В., Карпов А.В., Лезина Е.А., Ульяненко А.В. Вариации газовых компонент загрязнения в воздушном бассейне г. Москвы // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2006. Т. 42. № 2. С. 176–190.
11. Маркова Т.А., Еланский Н.Ф., Беликов И.Б., Грисенко А.М., Севастьянов В.В. Распределение окислов азота в приземном слое атмосферы над континентальными районами России // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2004. Т. 40. № 6. С. 796–808.
12. Ровинский Ф.Я., Егоров В.И. Озон, окислы азота и серы в нижней атмосфере. Л.: Гидрометеопиздат, 1986. 184 с.

*V.L. Potemkin, V.L. Makukhin. Study of trace gas admixture dynamics in the atmosphere of the Baikal region.*

The analysis of data on nitrogen dioxide concentrations in Irkutsk surroundings in winter 2005–06 obtained with the gas-analyzer and the comparison of these data with meteorological conditions for the same period are presented. Two types of diurnal behavior have been determined. The concentrations of sulfur dioxide and nitrogen oxide were 1–10 µg/m<sup>3</sup> over the water surface of Lake Baikal. Maximal values of sulfur dioxide were recorded in the vicinity of Baikal Pulp and Paper Plant (Southern Baikal).

Data on calculations and measurements of sulfur and nitrogen dioxide concentrations are in good correlation.