

В.Л. Потемкин<sup>1</sup>, И.В. Латышева<sup>2</sup>, В.Л. Макухин<sup>1</sup>, Т.В. Ходжер<sup>1</sup>

## Исследование процессов распространения диоксида серы и озона на юге Восточной Сибири

<sup>1</sup> *Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск*

<sup>2</sup> *Иркутский государственный университет*

Поступила в редакцию 27.06.2005 г.

Выполнен анализ данных, полученных при измерении с помощью газоанализатора концентраций диоксида серы за холодный период 2005 г. в окрестностях г. Иркутска в сопоставлении с метеорологическими условиями за этот же период. С использованием численной модели распространения и трансформации примесей выявлены области повышенного загрязнения соединениями серы в регионе оз. Байкал. Проведено сравнение результатов расчетов и данных измерений концентраций диоксида серы, получено их удовлетворительное соответствие. Выявлены типы метеорологических условий, способствующие повышению загрязнения атмосферы.

Проведены численные расчеты для исследования формирования областей максимальных концентраций озона. Выполнены исследования влияния скорости и направления ветра, концентрации водяного пара на процессы распространения и трансформации примесей.

### Введение

В настоящее время как у нас в стране, так и за рубежом ведутся интенсивные исследования по разработке моделей переноса и трансформации загрязняющих веществ в атмосфере, выбрасываемых промышленными предприятиями. Уже существует множество различных математических моделей, как вероятностно-статистических, так и детерминированных: эйлерова типа, лагранжева типа, гибридных, т.е. сочетающих подходы Эйлера и Лагранжа. Трансформация и перенос соединений серы и азота исследовались с помощью аналитических моделей: балансовой с элементами статистики и двумерной стационарной диффузионной [1]. Существенным недостатком этих моделей, не учитывающих влияние рельефа, является то, что вертикальное распределение примесей предполагается равномерным. С использованием модели эйлерова типа была предпринята попытка оценить влияние антропогенного загрязнения пылью, окислами серы и азота на оз. Байкал и окружающие его территории при различных метеорологических ситуациях [2] с учетом эволюции атмосферных аэрозолей за счет коагуляции [3]. Отметим, что все численные эксперименты в этих работах проведены с шагом по пространству 25 км, что больше средней ширины хребтов в регионе озера.

### Цель и методы исследования

Цель данной работы — изучение влияния метеорологических условий на процессы формирования полей концентраций загрязняющих веществ, в частности диоксида серы как одного из основных загрязнителей, в холодный период года. Работа

явилась продолжением начатых ранее исследований [4, 5]. Измерения диоксида серы проводились с помощью хемилюминесцентного газоанализатора С-310 (фирма ОПТЭК, г. Санкт-Петербург, погрешность измерений не превышает 25%) в Академгородке г. Иркутска, в долине р. Ангара на левом ее берегу. В дополнение к инструментальным измерениям были выполнены численные эксперименты с помощью математической модели распространения и трансформации примесей [6]. В отличие от предыдущих работ здесь модельные расчеты проводились с хорошим разрешением по пространству (шаг сетки по горизонтали равен 1 км).

### Обсуждение результатов

По данным измерений были определены средние по срокам концентрации диоксида серы. Соответствующие часовые значения за март 2005 г. приведены на рис. 1.

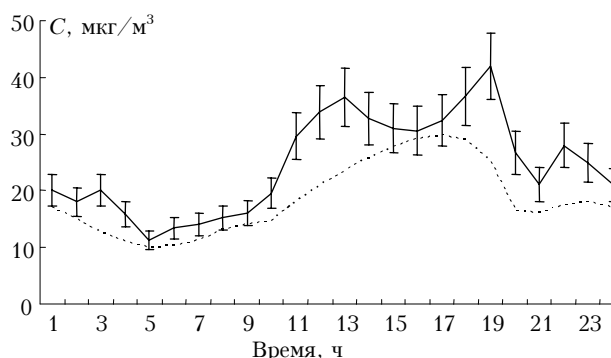


Рис. 1. Усредненные по срокам за март измеренные (сплошная линия) и рассчитанные (пунктирная кривая) концентрации диоксида серы в атмосфере г. Иркутска

Хорошо выражен суточный ход концентраций с минимумом утром и максимумом в послеполуденные часы. При обсуждении рис. 1 следует учитывать расположение пункта отбора проб – в верхней части северо-восточного склона долины р. Ангара. Вечерний локальный минимум около 21 ч, отмеченный и в модельных расчетах, следует связать с местным ветровым режимом – ослаблением общей циркуляции и формированием стоковых потоков вниз по склону. Разделение дневного максимума на два пика (13 и 19 ч) скорее всего объясняется относительно коротким рядом наблюдений и большим разбросом величин в связи с тем, что в марте происходят разрушение азиатского антициклона и перестройка барического поля.

Данные измерений были дополнены результатами расчетов по модели распространения и трансформации примесей. Как известно, временные изменения значений концентраций выбрасываемых примесей обусловлены колебаниями интенсивностей выбросов промышленных объектов и метеорологическими процессами. Источниками выбросов диоксида серы являлись промышленные объекты гг. Усолье-Сибирское, Ангарск, Шелехов, Иркутск, Слюдянка, Байкальск. Данные об интенсивности источников были взяты из работ [7, 8]. Метеорологические характеристики (направление и скорость ветра, температура и влажность воздуха, давление) измерялись портативной метеостанцией, расположенной вблизи пункта отбора проб.

Моделирование процессов распространения примесей проводилось в области площадью 200 × 200 км и высотой 4 км над поверхностью оз. Байкал. Шаги по времени и горизонтали составляли соответственно 150 с и 1 км; шаг по вертикали задавался следующим образом: до высоты 350 м он равнялся 50 м, далее – 150, 500, 1000 и 2000 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, водяного пара H<sub>2</sub>O – 2,23 · 10<sup>-4</sup>, молекулярного водорода H<sub>2</sub> – 10<sup>-7</sup> и озона O<sub>3</sub> – 6 · 10<sup>-8</sup> кг/м<sup>3</sup>. Предполагалось, что в воздухе постоянно присутствует перекись водорода H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> и ее концентрация, равная 10<sup>-9</sup> кг/м<sup>3</sup>, не меняется в пространстве и во времени. Коэффициенты турбулентной диффузии рассчитывались с использованием соотношений полупырической теории турбулентности [6].

Для подтверждения достоверности результатов, полученных с помощью модели распространения и трансформации примесей, была проведена первая серия численных экспериментов. Результаты сравнения модельных расчетов концентраций диоксида серы и данных измерений с помощью газоанализатора приведены на рис. 1. Коэффициент корреляции между расчетными и измеренными концентрациями равен 0,8. Относительные ошибки расчетов не превосходили 33%, среднеквадратическое отклонение этих ошибок составило 14%.

Следующая серия численных экспериментов проводилась для исследования влияния метеороло-

гических характеристик на распространение и трансформацию примесей. Варьировались направление и скорость ветра и начальное значение концентрации водяного пара (значение 22 г/м<sup>3</sup>, характерное для тропиков, было выбрано для демонстрации возможностей модели). Некоторые полученные результаты представлены в таблице.

**Расчитанные значения концентраций соединений серы, азота и малых газовых составляющих атмосферы в атмосфере г. Иркутска**

Ингредиент	Концентрация, мкг/м <sup>3</sup>				
	Направление (скорость ветра, м/с)				
	СЗ (5)		СЗ (3)	ЮЗ (5)	
	Концентрация водяного пара, г/м <sup>3</sup>				
	0,22	2,2	22	2,2	2,2
SO <sub>2</sub>	48	48	43	62	0,5
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,54	1,5	7,4	2,3	0,04
NO <sub>2</sub>	5,3	5	5,7	6,6	0,06
HNO <sub>3</sub>	0,74	1,9	7,1	2,7	0,07
HNO <sub>4</sub> · 10 <sup>4</sup>	0,21	0,7	4,7	1	0,23
NO	2,1	2	1,4	2,2	0,04
NO <sub>3</sub> · 10 <sup>4</sup>	1,4	1,4	1,4	2	0,04
HNO <sub>2</sub>	0,04	0,13	0,61	0,13	0,02
N <sub>2</sub> O <sub>5</sub> · 10 <sup>4</sup>	1,1	1,1	0,78	2	0,0004
OH <sup>-</sup> · 10 <sup>4</sup>	0,11	0,36	2,7	0,33	3
HO <sub>2</sub> · 10 <sup>3</sup>	0,05	0,16	1,5	0,17	4,6
O <sub>3</sub>	55	55	55	65	68
H <sup>+</sup> · 10 <sup>16</sup>	1,1	1	0,9	1,2	0,52

Выполненные расчеты показали существенное влияние изменения начальной концентрации водяного пара на концентрацию атмосферных примесей. При изменении концентрации водяного пара в атмосфере на порядок концентрации OH<sup>-</sup> и HO<sub>2</sub><sup>-</sup> также изменяются на порядок, концентрации HNO<sub>4</sub> – в 7 раз, концентрации H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> и HNO<sub>2</sub> – в 5 раз, концентрации HNO<sub>3</sub> – в 4 раза. Уменьшение скорости северо-западного ветра (до 3 м/с) приводит к увеличению значений концентраций большинства атмосферных примесей. Юго-западный и юго-восточный потоки способствуют очищению атмосферы над г. Иркутском, они вызывают уменьшение концентраций основных загрязнителей, концентрации водородных радикалов OH<sup>-</sup> и HO<sub>2</sub><sup>-</sup>, наоборот, растут, восстанавливаясь до фоновых значений.

На рис. 2 и 3 представлены распределения концентраций диоксида серы и озона при северо-западном ветре со скоростью 5 м/с и начальном значении концентрации водяного пара 2,2 г/м<sup>3</sup>. Наибольшие значения концентраций SO<sub>2</sub> получены по долине р. Ангара, где расположены основные источники выбросов примесей. Максимальные концентрации O<sub>3</sub> наблюдаются над акваторией оз. Байкал, склонами хребта Хамар-Дабан и Олхинским плато, т.е. в районах, которые менее подвержены воздействию атмосферных выбросов.

## Заключение

Таким образом, при проведении измерений концентраций диоксида серы в Академгородке г. Иркутска отмечен хорошо выраженный суточный ход концентраций с минимумом утром и максимумом в послеполуденные часы. Высказано предположение, что вечерний локальный минимум около 21 ч обусловлен ослаблением общей циркуляции и формированием стоковых потоков вниз по склону. Сравнение данных наблюдений за диоксидом серы и результатов расчетов показало их хорошее соответствие ( $R = 0,8$ ). Проведенные численные эксперименты позволили определить количественную зависимость концентраций атмосферных примесей от начальной концентрации водяного пара. При изменении концентрации водяного пара в атмосфере на порядок концентрации отдельных составляющих атмосферы изменяются в несколько раз: для соединений серы в 5 раз, для соединений азота в 4–7 раз. Направление и скорость ветра также оказывают существенное влияние на распространение примесей.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, грант № 05-05-97232-р.

1. Кудрявцева Л.В., Устинова С.И. Оценка вклада дальнего переноса соединений серы и азота в их поступление в озеро Байкал // Мониторинг и оценка состояния Байкала и Прибайкалья. Л.: Гидрометеиздат, 1991. С. 86–92.
2. Пененко В.В., Алоян А.Е. Математические модели взаимосвязей между термодинамическими и химическими процессами в атмосфере промышленных регионов // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 1995. Т. 31. № 3. С. 372–384.
3. Алоян А.Е., Загайнов В.А., Лушиников А.А., Макаренко С.В. Перенос трансформирующегося аэрозоля в атмосфере // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1991. Т. 27. № 11. С. 1232–1240.
4. Makukhin V.L., Potemkin V.L. Numerical simulation of sulfur and nitrogen compounds distribution near the lake Baikal // J. Aerosol Sci. 2000. V. 31. Suppl. 1. P. S424–S425.
5. Makukhin V.L., Potemkin V.L. Numerical simulation of air pollution above Southern Baikal area at local winds // Proc. SPIE. 2000. V. 4341. P. 580–585.
6. Arguchintsev V.K., Makukhin V.L. Simulation of the spreading and transformation of sulphur and nitrogen compounds in the atmosphere of the southern region around Lake Baikal // Proc. SPIE. 2000. V. 4341. P. 593–599.
7. Государственный доклад. О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2002 году / Под ред. Н.Л. Корзуна. Иркутск: Гл. упр. прир. ресурсов и охр. окр. среды МПР России по Иркутской области, 2004. 328 с.
8. Охрана атмосферного воздуха. Статистический бюллетень. Иркутск: Облкомстат, 2000. 165 с.

### V.L. Potemkin, I.V. Latysheva, V.L. Makukhin, T.V. Khodzher. Studies of processes of sulfur dioxide and ozone distribution in the south of Eastern Siberia.

This work presents the analysis of data on sulfur dioxide concentrations in Irkutsk surroundings in winter-spring 2005 obtained with the gas-analyzer, as well as the comparison of these data with meteorological conditions for the same period. The numerical model of distribution and transformation of admixtures helps to reveal the areas with increased level of pollution by sulfur compounds in the Lake Baikal region. Data on calculations and measurements of sulfur dioxide concentrations are in good correlation. Types of meteorological conditions contributing to the atmosphere pollution have been determined.

Areas of maximal concentrations of ozone have been calculated. It has been revealed that velocity and direction of winds and concentration of water vapour influence the processes of distribution and transformation of admixtures.

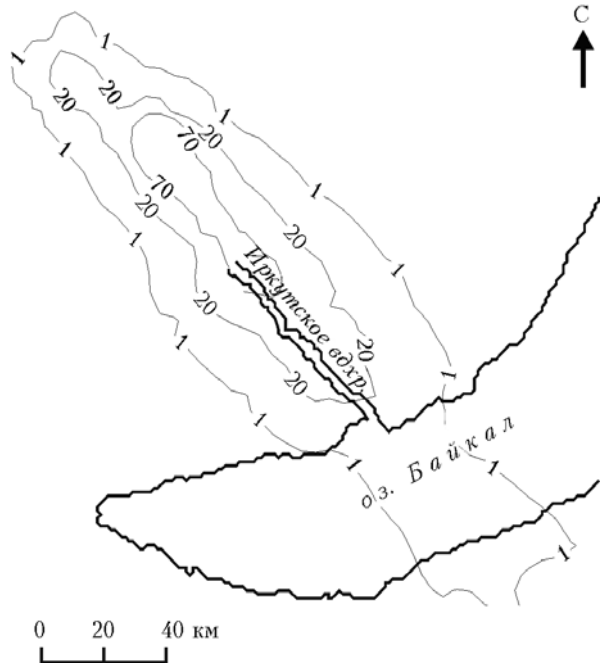


Рис. 2. Изолинии рассчитанных приземных концентраций диоксида серы в регионе Южного Байкала при северо-западном ветре,  $\text{мкг}/\text{м}^3$

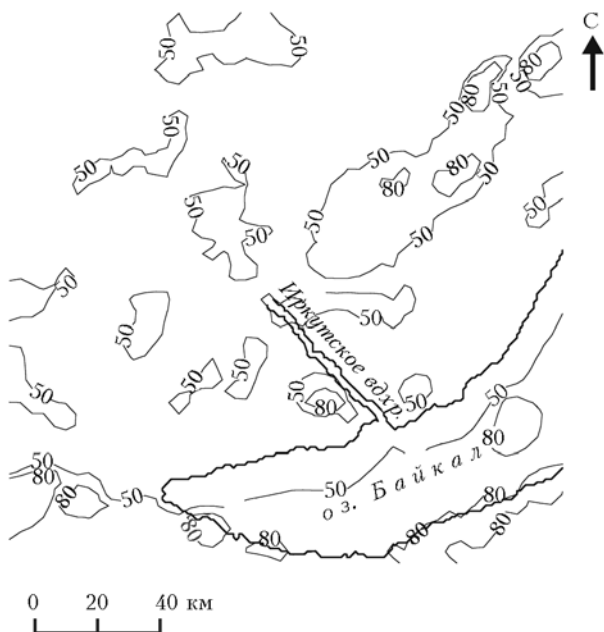


Рис. 3. Изолинии рассчитанных приземных концентраций озона в регионе Южного Байкала при северо-западном ветре,  $\text{мкг}/\text{м}^3$