

В.К. Аргучинцев, В.Л. Макухин

## Численное моделирование распространения, трансформации и осаждения соединений серы, азота и углерода в регионе оз. Байкал

*Иркутский государственный университет,  
Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск*

Поступила в редакцию 27.11.2001 г.

С помощью численного решения полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии примеси выполнены оценки массы кислот, попадающих из атмосферы на оз. Байкал и прибрежные территории за год.

Одна из острейших глобальных проблем современности связана с повышением кислотности атмосферных осадков и почвенного покрова. Кислотные дожди возникают в результате хозяйственной деятельности человека, сопровождающейся эмиссией оксидов серы, азота, углерода при сжигании сланцев, нефти, углей, газа. Эти соединения, поступая в атмосферу, переносятся на большие расстояния, взаимодействуют с водой и превращаются в растворы смеси органических и неорганических кислот, которые, выпадая с осадками, оказывают отрицательное воздействие на наземную и водную экосистемы. Кислые осадки наблюдались в США, Великобритании, Германии, Голландии, Дании, странах Скандинавии, на территории других европейских государств, в Подмосковье, на северо-западе России. В последние годы проблема выпадения кислых осадков приобрела актуальность и в азиатской части нашей страны, о чем свидетельствуют результаты инструментальных исследований [1,2].

Данная работа является продолжением изучения процессов распространения, трансформации и осаждения соединений серы и азота в регионе оз. Байкал с помощью математической модели, начатого в [3–6]. Здесь уделяется внимание анализу зависимости плотности массового расхода осаждающихся на поверхность озера кислот от влажности атмосферы. Источниками выбросов оксидов серы и азота являлись промышленные предприятия 25 городов и поселков, в основном расположенных в непосредственной близости к Байкалу (наиболее крупные из них – Слюдянка, Байкальск, Нижнеангарск, Северобайкальск), а также удаленных от береговой линии на расстояния до 70 км (Иркутск, Шелехов, Селенгинск, Каменск). Величины массового расхода диоксидов серы и азота были определены на основе работ [7–11]. Статистические характеристики поля ветра, использованные в расчетах, были получены при обработке данных многолетних наблюдений за вектором скорости ветра [12, 13].

Расчеты проводились в области площадью  $250 \times 700 \text{ км}^2$  и высотой 5 км над поверхностью оз. Байкал. Шаги по времени и горизонтали составляли соответственно 150 с и 5 км; шаг по вертикали задавался следующим образом: до высоты 300 м он равнялся 50 м, далее – 200, 1000, 1500 и 2000 м. Коэффициенты турбулентной диффузии рассчитывались с использованием

соотношений полуэмпирической теории турбулентности [6]. Предполагалось, что выбрасываемые источниками примеси равномерно распределены в одной пространственной ячейке сеточной области. Начальная концентрация молекулярного азота  $[\text{N}_2]$  принималась равной  $0,93 \text{ кг/м}^3$ , молекулярного кислорода  $[\text{O}_2] = 0,297 \text{ кг/м}^3$ ,  $[\text{H}_2\text{O}_2] = 10^{-9} \text{ кг/м}^3$ , молекулярного водорода  $[\text{H}_2] = 10^{-7} \text{ кг/м}^3$ . Начальная концентрация водяного пара  $[\text{H}_2\text{O}]$  варьировалась от  $2,23 \cdot 10^{-6}$  до  $2,23 \cdot 10^{-2} \text{ кг/м}^3$ , т.е. масса  $\text{H}_2\text{O}$  составляла от  $1,7 \cdot 10^{-4}$  до 1,7% массы воздуха. Молекулярный кислород и водяной пар участвовали только в процессе трансформации примесей.

В табл. 1 приведены рассчитанные значения концентраций соединений серы, азота и малых газовых составляющих атмосферы в приводном слое оз. Байкал при начальной концентрации  $[\text{H}_2\text{O}] = 2,23 \cdot 10^{-4} \text{ кг/м}^3$ . Во второй и последующих колонках эти значения даны на профиле, проходящем через ст. Дулиха (подножье хр. Хамар-Дабан) и ориентированном с юго-запада на северо-восток, на различных расстояниях от этой станции (расстояния указаны в километрах). Сравнение результатов расчетов концентраций сульфатов и нитратов и данных инструментальных измерений [4] показало их качественное и количественное соответствие. Концентрации других малых составляющих атмосферы по порядку величины соответствуют наблюдаемым в других регионах [14–26]. Из данных табл. 1 следует, что южная котловина озера загрязняется значительно сильнее, чем средняя, значения концентраций в южной (колонки 2, 3 и 4) превышают соответствующие значения в средней котловине (колонки 5, 6 и 7) на порядок и более.

На рис. 1–4 представлены рассчитанные значения плотности массового расхода серной, азотной, азотистой и перексоазотной кислот в регионе оз. Байкал. Наибольшее воздействие этих соединений отмечено в долине р. Ангара (выбросы Иркутска и Шелехова), над Южным Байкалом, между п. Листвянка и ст. Выдрино – в результате выбросов предприятий Приангарья, Слюдянки и Байкальска, в районе выбросов Селенгинска и Каменска, на севере Байкала (выбросы Северобайкальска и Нижнеангарска). Отметим, что максимум в южной части озера смещен относительно расположения источников выбросов.

Рассчитанные значения концентраций,  $\text{мкг}/\text{м}^3$ , соединений серы, азота и малых газовых составляющих атмосферы в приземном слое оз. Байкал

Ингредиент	Расстояние от ст. Дулиха, км							
	20	70	120	160	200	320	375	435
1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\text{SO}_2$	9	0,08	0,01	0,5	0,2	0,008	$2 \cdot 10^{-6}$	0,0005
$\text{H}_2\text{SO}_4$	1	0,1	0,02	0,2	0,3	0,01	$3 \cdot 10^{-6}$	0,002
$\text{HSO}_3 \cdot 10^{11}$	2	0,05	0,005	0,3	0,2	0,004	$9 \cdot 10^{-7}$	0,0003
$\text{SO}_3 \cdot 10^9$	5	0,2	0,02	0,9	0,6	0,01	$3 \cdot 10^{-6}$	0,001
$\text{SO}_2^* \cdot 10^{11}$	4	0,046	0,005	0,2	0,1	0,004	$10^{-6}$	0,0002
$\text{SO}_3 \cdot 10^{17}$	4	0,0003	$5 \cdot 10^{-6}$	0,01	0,003	$3 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-13}$	$10^{-8}$
$\text{NO}_2 \cdot 10^2$	4	0,03	0,003	0,2	0,2	0,005	$6 \cdot 10^{-7}$	0,0003
$\text{HNO}_3 \cdot 10$	2	0,1	0,02	0,3	0,6	0,03	$10^{-5}$	0,002
$\text{HNO}_4 \cdot 10^7$	2	0,08	0,009	0,4	0,7	0,03	$10^{-6}$	0,01
NO	2	0,02	0,003	0,2	0,1	0,003	$10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-5}$
$\text{NO}_3 \cdot 10^7$	1	0,3	0,05	0,7	2	0,07	$2 \cdot 10^{-5}$	0,006
$\text{HNO}_2 \cdot 10$	2	0,07	0,01	0,6	0,5	0,01	$2 \cdot 10^{-6}$	0,0001
$\text{N}_2\text{O}_5 \cdot 10^{11}$	9	0,01	0,0003	0,2	0,6	0,0008	$2 \cdot 10^{-11}$	$3 \cdot 10^{-6}$
$\text{OH} \cdot 10^3$	0,6	2	2	2	3	2	1	2
$\text{HO}_2 \cdot 10^3$	0,6	3	3	2	4	5	2	31
$\text{O}(\text{D}) \cdot 10^{13}$	1	0,05	0,01	0,2	0,2	0,01	0,0001	0,002
$\text{O}_3$	5	0,2	0,04	0,7	0,9	0,06	0,0005	0,009
$\text{O}(\text{P}) \cdot 10^8$	2	0,08	0,02	0,3	0,4	0,02	0,0002	0,004
$\text{H} \cdot 10^{18}$	2	0,04	0,005	0,3	0,6	0,02	$4 \cdot 10^{-5}$	0,02
$\text{H}_2\text{O}_2 \cdot 10$	4	1	1	3	4	2	0,6	15

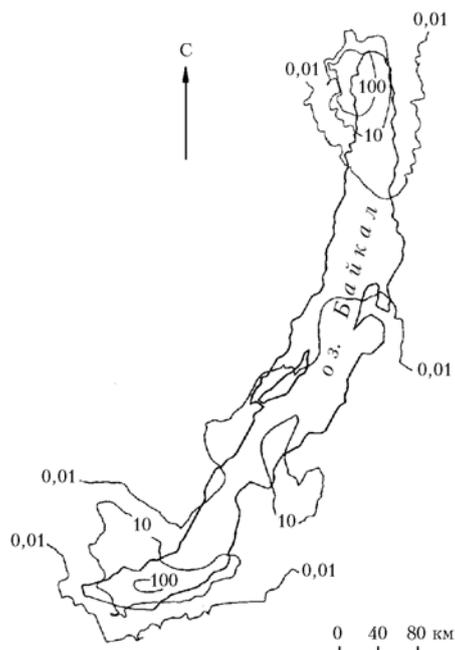


Рис. 1. Изолинии рассчитанной плотности массового расхода  $\text{H}_2\text{SO}_4$  у подстилающей поверхности региона оз. Байкал,  $\text{кг}/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$

Для исследования влияния влажности воздуха были проведены численные эксперименты с различными значениями начальной концентрации водяного пара. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Расчеты показали, что зависимость массы выпадающих кислот от влажности существенная: при увеличении содержания водяного пара в атмосфере с 0,017 до 1,7% массы воздуха масса серной, азотной и азотистой кислот, выпадающая на озеро, увеличивается в 2 раза.

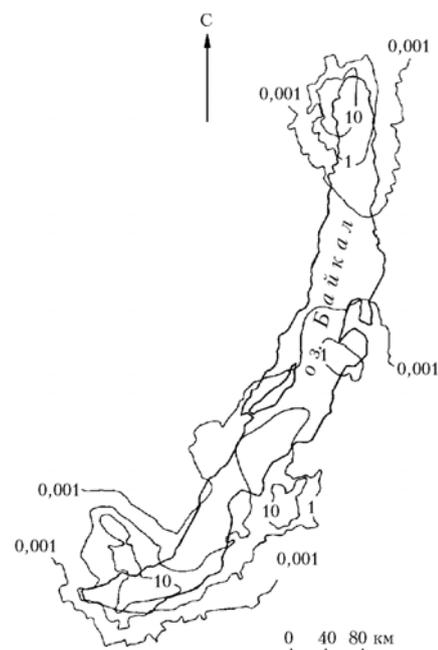


Рис. 2. Изолинии рассчитанной плотности массового расхода  $\text{HNO}_3$  у подстилающей поверхности региона оз. Байкал,  $\text{кг}/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$

Таблица 2

Рассчитанные массы основных неорганических кислот, выпадающие на оз. Байкал за год, кг

Начальная концентрация $[\text{H}_2\text{O}]$ , $\text{кг}/\text{м}^3$	Масса, кг			
	$\text{H}_2\text{SO}_4$	$\text{HNO}_3$	$\text{HNO}_2$	$\text{HNO}_4$
$2,23 \cdot 10^{-6}$	7680	1120	1030	0,017
$2,23 \cdot 10^{-4}$	7780	1140	1050	0,017
$2,23 \cdot 10^{-2}$	14080	2360	2160	0,022

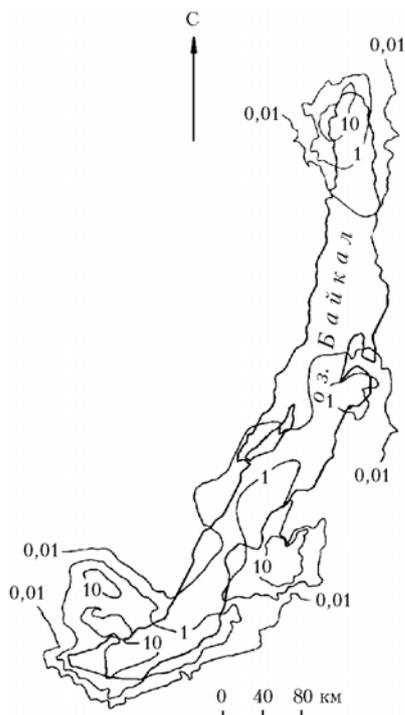


Рис. 3. Изолинии рассчитанной плотности массового расхода  $\text{HNO}_2$  у подстилающей поверхности региона оз. Байкал,  $\text{кг}/(\text{км}^2\cdot\text{год})$

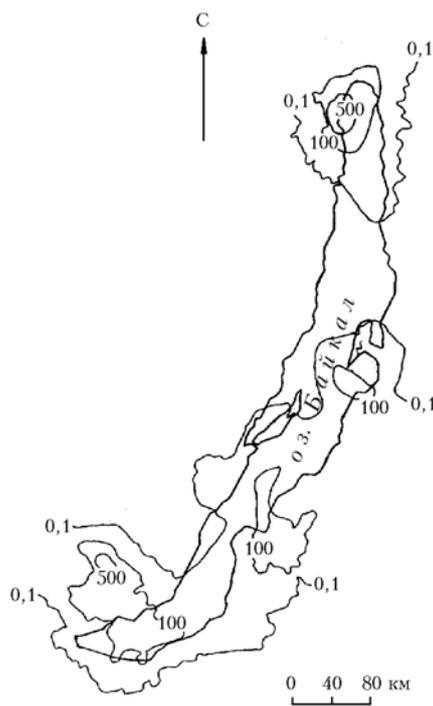


Рис. 4. Изолинии рассчитанной плотности массового расхода  $\text{HNO}_4$  у подстилающей поверхности региона оз. Байкал,  $\text{мг}/(\text{км}^2\cdot\text{год})$

Отметим, что величина осаднения зависит также от присутствия других составляющих атмосферы. При увеличении начальной концентрации  $\text{H}_2\text{O}_2$  на два порядка (с  $10^{-10}$  до  $10^{-8}$   $\text{кг}/\text{м}^3$ ) масса серной, азотной и азотистой кислот, осаждающаяся на Байкал за год, увеличивается в 7 (с 2,5 до 18 т), в 40 (с 0,2 до 6,6 т) и в 4 раза (с 0,4 до 1,5 т) соответственно. При изменении начальной концентрации атомарного кислорода  $\text{O}(^3\text{P})$  также на два порядка (с  $10^{-14}$  до  $10^{-12}$   $\text{кг}/\text{м}^3$ ) масса серной кислоты увеличивается с 0,3 до 1,6 т, азотной – с 0,02 до 0,5 т, азотистой – с 0,05 до 0,2 т. Таким образом, начальное распределение концентраций малых составляющих атмосферы существенно влияет на загрязнение озера.

Полученные результаты могут быть использованы при оценке вклада массы кислот, выпадающих с осадками, в общую массу кислот, попадающих в озеро Байкал при сухом и влажном осаднении.

1. Семенов М.Ю., Нецветаева О.Г., Кобелева Н.А., Ходжер Т.В. Современная и допустимая кислотные нагрузки на территорию азиатской части России // *Оптика атмосфер. и океана*. 2001. Т. 14. № 6–7. С. 499–504.
2. Нецветаева О.Г., Ходжер Т.В., Оболкин В.А., Кобелева Н.А., Голобокова Л.П., Коровякова И.В., Чубаров М.П. Химический состав и кислотность атмосферных осадков в Прибайкалье // *Оптика атмосфер. и океана*. 2000. Т. 13. № 6–7. С. 618–621.
3. Аргунинцев В.К., Макухин В.Л. Математическое моделирование распространения аэрозолей и газовых примесей в пограничном слое атмосферы // *Оптика атмосфер. и океана*. 1996. Т. 9. № 6. С. 804–814.
4. Аргунинцев В.К., Макухин В.Л., Оболкин В.А., Потемкин В.Л., Ходжер Т.В. Исследование распределения соединений серы и азота в приземном слое оз. Байкал // *Оптика атмосфер. и океана*. 1996. Т. 9. № 6. С. 748–754.

5. Аргунинцев 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 атмосфер. и океана*. 1997. Т. 10. № 6. С. 598–604.
6. Аргунинцев В.К., Макухин В.Л. Моделирование вертикального распределения концентраций соединений серы и азота в пограничном слое атмосферы Южного Прибайкалья // *Оптика атмосфер. и океана*. 1998. Т. 11. № 6. С. 594–597.
7. Государственный доклад. О состоянии окружающей природной среды Иркутской области в 1999 году / Гл. ред. А.Л. Малевский. Иркутск: Гос. комитет по охране окр. среды Ирк. обл., 2000. 320 с.
8. Охрана атмосферного воздуха: Статистический бюллетень. Иркутск: Облкомстат, 2000. 165 с.
9. Охрана атмосферного воздуха за 1997 год (в разрезе городов и районов): Статистический бюллетень. Иркутск: Гос. комитет РФ по статистике, 1998. 161 с.
10. Проблемы охраны озера Байкал и природопользование в Байкальском регионе. М.: Гидрометеиздат, 1994. 99 с.
11. Мониторинг состояния озера Байкал. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 262 с.
12. Метеорологические ежемесячники. Вып. 22. Ч. 2. Новосибирск: Гос. комитет СССР по гидромет. и контролю природной среды, 1985–1994. 9096 с.
13. Метеорологические ежемесячники. Вып. 23. Ч. 2. Чита: Гос. комитет СССР по гидромет. и контролю природной среды, 1985–1994. 9062 с.
14. Кароль И.Л., Розанов В.В., Тимофеев Ю.М. Газовые примеси в атмосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 192 с.
15. Брасье Г., Соломон С. Аэрономия средней атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 414 с.
16. Марчук Г.И., Кондратьев К.Я. Приоритеты глобальной экологии. М.: Наука, 1992. 264 с.
17. Dimitroulopoulos C. and Marsh A.R.W. Modelling studies of  $\text{NO}_3$  nighttime chemistry and its effects on subsequent ozone formation // *Atmos. Environ.* 1997. V. 31. № 18. P. 3041–3057.

18. Бримблкумб П. Состав и химия атмосферы / Пер. с англ. М.: Мир, 1988. 352 с.
19. Химия окружающей среды / Под ред. Дж.О.М. Бокриса. М.: Химия, 1982. 672 с.
20. Кароль И.Л., Затевахин М.А., Ожигина Н.А., Озолин Ю.Э., Рамаросон Р., Розанов Е.В., Станкова Е.Н. Численная модель динамических, микрофизических и фотохимических процессов в конвективном облаке // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2000. Т. 36. № 6. С. 778–793.
21. Гершензон Ю.М., Звенигородский С.Г., Розенштейн В.Б. Химия радикалов OH, HO<sub>2</sub> в земной атмосфере // Успехи химии. 1990. Т. 59. Вып. 10. С. 1601–1626.
22. Захаров В.М., Костко О.К., Хмелевцов С.С. Лидары и исследование климата. Л.: Гидрометеониздат, 1990. 320 с.
23. Thompson A.M. Measuring and Modeling the Tropospheric Hydroxyl Radical (OH) // J. Atmos. Sci. 1995. V. 52. № 19. P. 3315–3327.
24. Armerding W., Spickermann M., Walter J. and Gomes F.J. MOAS: An Absorption Laser Spectrometer for Sensitive and Loae Monitoring of Tropospheric OH and Other Trace Gases // J. Atmos. Sci. 1995. V. 52. № 19. P. 3381–3392.
25. Imasu R., Suda A. and Matsuno T. Radiative Effects and Halocarbon Global Warming Potentials of Replacement Compounds for Clorofluorocarbons // J. Meteorol. Soc. Jap. 1995. V. 73. № 6. P. 1123–1136.
26. Пененко В.В., Алюян А.Е. Модели и методы для задач охраны окружающей среды. Новосибирск: Наука, 1985. 256 с.

***V.K. Arguchintsev, V.L. Makukhin. Numerical simulation of spread, transformation, and deposition of S, N, and C compounds in the Baikal region.***

An assessment of the amount of acids annually deposited from the atmosphere to the Lake Baikal surface and nearby areas as carried out by numerical solution of the semi-empirical equation of impurity turbulence diffusion.