

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 H_2O 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.

Таблица 1

Рассчитанные значения концентраций, $\text{мкг}/\text{м}^3$, соединений серы, азота и малых газовых составляющих атмосферы в придном 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
SO_2	9	0,08	0,01	0,5	0,2	0,008	$2 \cdot 10^{-6}$	0,0005
H_2SO_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
$\text{SO} \cdot 10^{17}$	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
$\text{O}^{(1D)} \cdot 10^{13}$	1	0,05	0,01	0,2	0,2	0,01	0,0001	0,002
O_3	5	0,2	0,04	0,7	0,9	0,06	0,0005	0,009
$\text{O}^{(3P)} \cdot 10^8$	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

На рис. 1–4 представлены рассчитанные значения плотности массового расхода серной, азотной, азотистой и перексозотной кислот в регионе оз. Байкал.

бросов Селенгинска и Каменска, на севере Байкала (выбросы Северобайкальска и Нижнеангарска). Отметим, что максимум в южной части озера смещен относительно расположения источников выбросов.

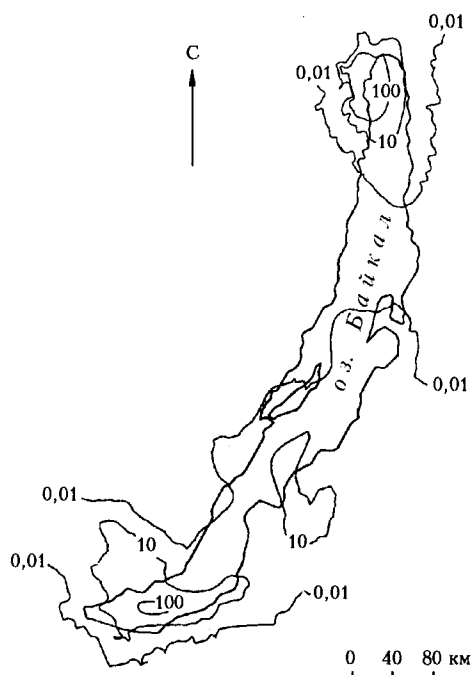


Рис. 1. Изолинии рассчитанной плотности массового расхода H_2SO_4 у подстилающей поверхности региона оз. Байкал, $\text{кг}/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$

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 вы-

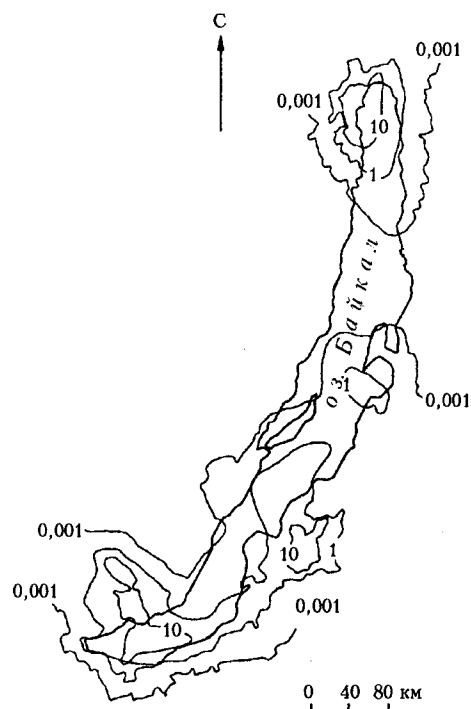


Рис. 2. Изолинии рассчитанной плотности массового расхода HNO_3 у подстилающей поверхности региона оз. Байкал, $\text{кг}/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$

Для исследования влияния влажности воздуха были проведены численные эксперименты с различными

значениями начальной концентрации водяного пара. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

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

Начальная концентрация $[H_2O]$, кг/м ³	Масса, кг			
	H ₂ SO ₄	HNO ₃	HNO ₂	HNO ₄
2,23·10 ⁻⁶	7680	1120	1030	0,017
2,23·10 ⁻⁴	7780	1140	1050	0,017
2,23·10 ⁻²	14080	2360	2160	0,022

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.

Отметим, что величина осаднения зависит также от присутствия других составляющих атмосферы. При увеличении начальной концентрации H₂O₂ на два порядка (с 10⁻¹⁰ до 10⁻⁸ кг/м³) 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 O(³P) также на два порядка (с 10⁻¹⁴ до 10⁻¹² кг/м³) 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.

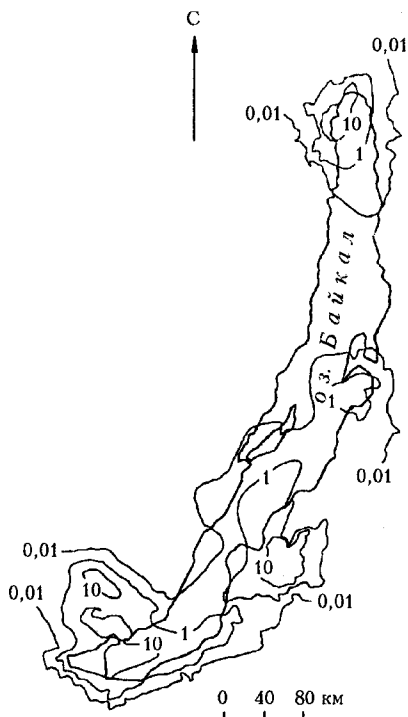


Рис. 3. Изолинии рассчитанной плотности массового расхода HNO₂ у подстилающей поверхности региона оз. Байкал, кг/(км²·год)

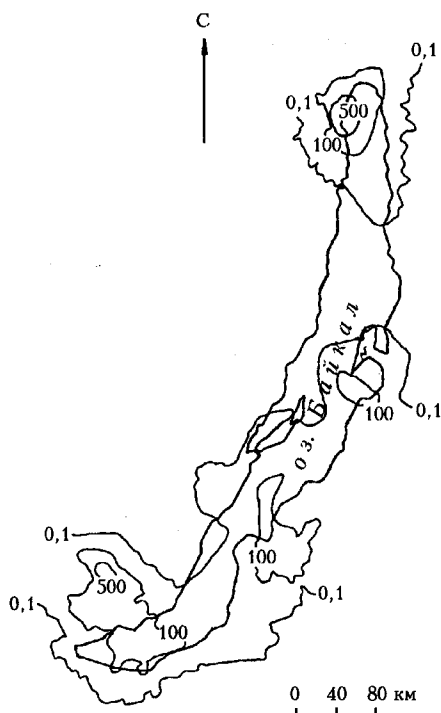


Рис. 4. Изолинии рассчитанной плотности массового расхода HNO₄ у подстилающей поверхности региона оз. Байкал, мг/(км²·год)

1. Семенов М.Ю., Нецветова О.Г., Кобелева Н.А., Ходжер Т.В. Современная и допустимая кислотные нагрузки на территорию азиатской части России // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14. № 6–7. С. 499–504.
2. Нецветова 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 атмосф. и океана. 2000. Т. 13. № 6–7. С. 618–621.
3. Аргучинцев 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.
4. Аргучинцев В.К., Макухин В.Л., Оболкин В.А., Потемкин В.Л., Ходжер Т.В. Исследование распределения соединений серы и азота в приводном слое оз. Байкал // Оптика атмосф. и океана. 1996. Т. 9. № 6. С. 748–754.
5. Аргучинцев 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.
6. Аргучинцев В.К., Макухин В.Л. Моделирование вертикального распределения концентраций соединений серы и азота в пограничном слое атмосферы Южного Прибайкалья // Оптика атмосф. 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 NO_3 nighttime chemistry and its effects on subsequent ozone formation // *Atmos. Environ.* 1997. V. 31. № 18. P. 3041–3057.
18. *Бримблжумб 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., Затевахи 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. атмосф. и океана*. 2000. Т. 36. № 6. С. 778–793.
21. *Гершензон Ю.М., Звенигородский С.Г., Розенштейн В.Б.* Химия радикалов OH , HO_2 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.: Гидрометеиздат, 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 Chlorofluorocarbons // *J. Meteorol. Soc. Jap.* 1995. V. 73. № 6. P. 1123–1136.
26. *Пененко В.В., Алоян 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.

Numerical simulation of spread, transformation, and deposition of sulfur, nitrogen, and carbon compounds in the Baikal region

V.K. Arguchintsev and V.L. Makukhin

*Irkutsk State University
Limnological Institute,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk*

Received November 27, 2001

We estimate the amount of acids deposited annually from the atmosphere onto the Lake Baikal surface and on the neighboring areas by solving numerically a semiempirical equation of turbulent diffusion.

One of the most urgent global problems nowadays is connected with the increase in acidity of atmospheric precipitation and topsoil. Acid rains result from human activity accompanied by emissions of sulfur, nitrogen, and carbon acids and combustion of oil, shale oil, coal, and gas. In the atmosphere these compounds are transported at long distances, interact with water, and transform into solutions of mixed organic and inorganic acids, which fall with precipitation and produce a harmful effect on the land and water ecosystems. Acid precipitations were observed in the USA, Great Britain, Germany, Netherlands, Denmark, Scandinavian countries, and on the territories of other European countries, as well as in Moscow region and in the northwestern Russia. In recent years, the problem of acid rain has become increasingly urgent for the Asian part of Russia as well, as indicated by the results of instrumental observations.^{1,2}

This paper continues the investigation into the processes of spread, transformation, and deposition of sulfur and nitrogen compounds in the Lake Baikal region with the use of mathematical modeling that was started in Refs. 3-6. In this paper the emphasis is put on the analysis of the dependence of the mass flow density of acids deposited onto the lake surface on the atmospheric humidity. The sources of emissions of sulfur and nitrogen oxides were industrial plants of 25 cities and towns located on Lake Baikal sides (the largest of them are Slyudyanka, Baikal'sk, Nizhneangarsk, Severobaikal'sk), as well as at the distance up to 70 km from the lakeside (Irkutsk, Shelekhov, Selenginsk, Kamensk). The values of the mass flow of sulfur and nitrogen dioxides were determined based on the data from Refs. 7-11. The statistical characteristics of the wind field used in the calculations were obtained from processing the many-year observations of the wind velocity.^{12,13}

The calculations were carried out for the region having the area of $250 \times 700 \text{ km}^2$ and the height of 5 km above the Lake Baikal surface. The time and horizontal

steps were, respectively, 150 s and 5 km, while the vertical step was specified in the following way: it was 50 m up to the height of 300 m, and then 200, 1000, 1500, and 2000 m. The turbulent diffusion coefficients were calculated with the use of equations of the semiempirical theory of turbulence.⁶ It was assumed that the gases emitted are distributed homogeneously in a spatial cell of a grid region. The initial concentrations were taken to be the following: 0.93 kg/m^3 for molecular nitrogen $[\text{N}_2]$, 0.297 kg/m^3 for molecular oxygen $[\text{O}_2]$, 10^{-9} kg/m^3 for $[\text{H}_2\text{O}_2]$, and 10^{-7} kg/m^3 for molecular hydrogen $[\text{H}_2]$. The initial concentration of water vapor $[\text{H}_2\text{O}]$ varied from $2.23 \cdot 10^{-6}$ to $2.23 \cdot 10^{-2} \text{ kg/m}^3$, that is, the H_2O mass used was from $1.7 \cdot 10^{-4}$ to 1.7% of the air mass. Molecular oxygen and water vapor were assumed to take part only in the transformation process.

Table 1 gives the calculated concentrations of sulfur and nitrogen compounds and minor atmospheric constituents in the surface atmosphere above Lake Baikal at the initial concentration $[\text{H}_2\text{O}] = 2.23 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^3$. The second and next columns present the same concentrations at the profile passing through St. Dulikha (near Khamar-Daban Ridge) and oriented from the southwest to the northeast at different distances from this station (distances are given in kilometers). The comparison of calculated concentrations of sulfates and nitrates with the data of instrumental measurements⁴ showed a satisfactory qualitative and quantitative agreement between them. The concentrations of other minor gases are close, in the order of magnitude, to those observed in other regions.¹⁴⁻²⁶ It follows from the Table 1 that the southern part of Lake Baikal is much more polluted than the central one, and the concentrations in the southern part (columns 2, 3, and 4) exceed the corresponding values in the central part (columns 5, 6, and 7) by the order of magnitude and more.

Figures 1-4 depict the calculated mass flow densities of sulfuric, nitric, nitrous, and peroxyntic acids in the Baikal region. The strongest effect of these

compounds was noticed in River Angara valley (emissions from Irkutsk and Shelekhov), over Southern Baikal, between Listvyanka and Vydrino due to emissions from industrial plants in Priangar’e, Slyudyanka, and Baikal’sk, in the region of emissions

from Selenginsk and Kamensk, and in the northern Baikal region (emissions from Severobaikal’sk and Nizhneangarsk). It should be noted that the maximum in the southern part of Lake Baikal is shifted with respect to the location of pollution sources.

Table 1. Calculated concentrations, in $\mu\text{g}/\text{m}^3$, of sulfur and nitrogen compounds and minor atmospheric constituents in the surface atmosphere above Lake Baikal

Ingredient	Distance from St. Dulikha, in km							
	20	70	120	160	200	320	375	435
1	2	3	4	5	6	7	8	9
SO ₂	9	0.08	0.01	0.5	0.2	0.008	$2 \cdot 10^{-6}$	0.0005
H ₂ SO ₄	1	0.1	0.02	0.2	0.3	0.01	$3 \cdot 10^{-6}$	0.002
HSO ₃ , $\cdot 10^{11}$	2	0.05	0.005	0.3	0.2	0.004	$9 \cdot 10^{-7}$	0.0003
SO ₃ , $\cdot 10^9$	5	0.2	0.02	0.9	0.6	0.01	$3 \cdot 10^{-5}$	0.001
SO ₂ *, $\cdot 10^{11}$	4	0.046	0.005	0.2	0.1	0.004	10^{-6}	0.0002
SO, $\cdot 10^{17}$	4	0.0003	$5 \cdot 10^{-6}$	0.01	0.003	$3 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-13}$	10^{-8}
NO ₂ , $\cdot 10^2$	4	0.03	0.003	0.2	0.2	0.005	$6 \cdot 10^{-7}$	0.0003
HNO ₃ , $\cdot 10$	2	0.1	0.02	0.3	0.6	0.03	10^{-5}	0.002
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}	$4 \cdot 10^{-5}$
NO ₃ , $\cdot 10^7$	1	0.3	0.05	0.7	2	0.07	$2 \cdot 10^{-5}$	0.006
HNO ₂ , $\cdot 10$	2	0.07	0.01	0.6	0.5	0.01	$2 \cdot 10^{-6}$	0.0001
N ₂ O ₅ , $\cdot 10^{11}$	9	0.01	0.0003	0.2	0.6	0.0008	$2 \cdot 10^{-11}$	$3 \cdot 10^{-6}$
OH, $\cdot 10^3$	0.6	2	2	2	3	2	1	2
HO ₂ , $\cdot 10^3$	0.6	3	3	2	4	5	2	31
O(¹ D), $\cdot 10^{13}$	1	0.05	0.01	0.2	0.2	0.01	0.0001	0.002
O ₃	5	0.2	0.04	0.7	0.9	0.06	0.0005	0.009
O(³ P), $\cdot 10^8$	2	0.08	0.02	0.3	0.4	0.02	0.0002	0.004
H, $\cdot 10^{18}$	2	0.04	0.005	0.3	0.6	0.02	$4 \cdot 10^{-5}$	0.02
H ₂ O ₂ , $\cdot 10$	4	1	1	3	4	2	0.6	15

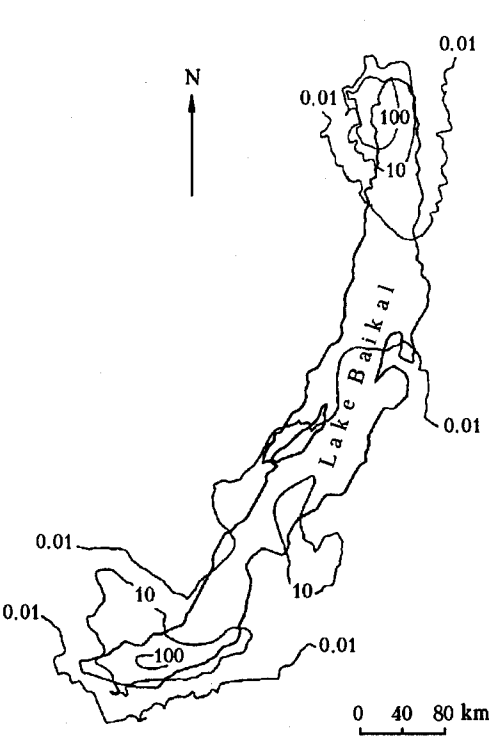


Fig. 1. Isoline of calculated mass flow density of H₂SO₄ in the surface atmosphere of the Baikal region, in $\text{kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{year})$.

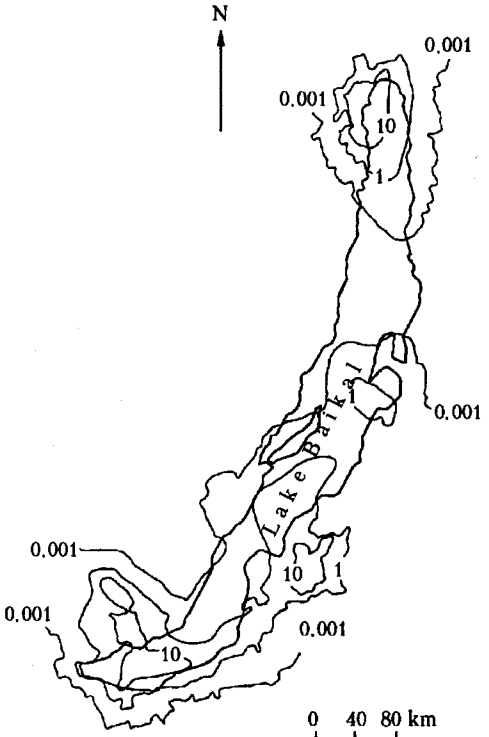


Fig. 2. Isoline of calculated mass flow density of HNO₃ in the surface atmosphere of the Baikal region, in $\text{kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{year})$.

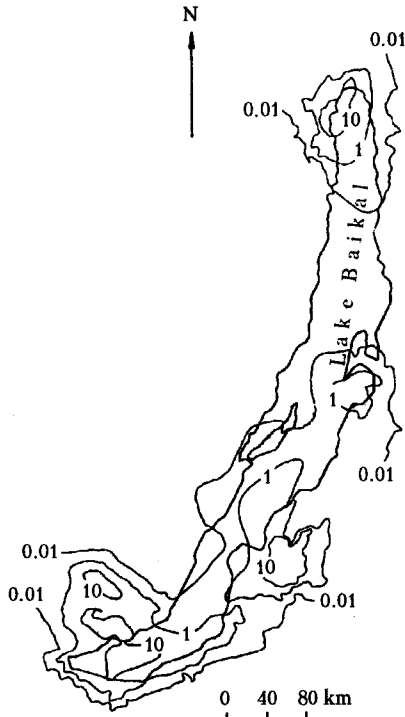


Fig. 3. Isoline of calculated mass flow density of HNO₂ in the surface atmosphere of the Baikal region, in kg/(km²·year).

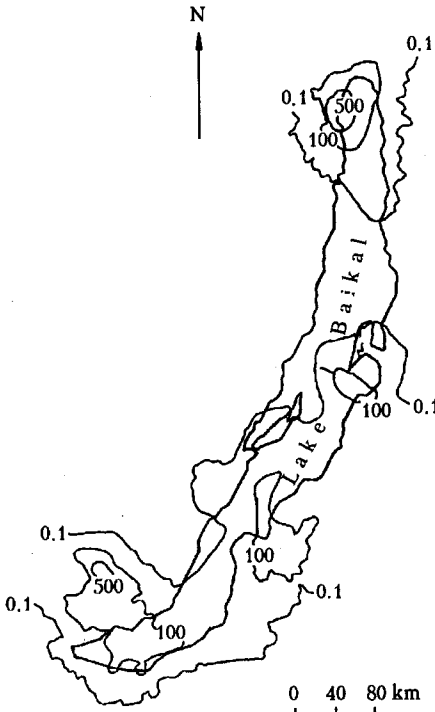


Fig. 4. Isoline of calculated mass flow density of HNO₄ in the surface atmosphere of the Baikal region, in kg/(km²·year).

To study the effect of air humidity, we conducted numerical experiments with different initial water vapor concentration. The results of these experiments are given in Table 2.

Table 2. Calculated masses of main organic acids deposited onto Lake Baikal, in kg, a year

Initial concentration of [H ₂ O], kg/m ³	Mass, kg			
	H ₂ SO ₄	HNO ₃	HNO ₂	HNO ₄
2.23·10 ⁻⁶	7680	1120	1030	0.017
2.23·10 ⁻⁴	7780	1140	1050	0.017
2.23·10 ⁻²	14080	2360	2160	0.022

The calculations showed that the mass of the acids deposited depends considerably on the air humidity: as the water content in the atmosphere increases from 0.017 to 1.7% of the air mass, the mass of sulfuric, nitric, and nitrous acids deposited onto the surface is doubled.

It should be noted that the amount of the acids deposited depends on the presence of other atmospheric constituents as well. As the initial concentration of H₂O₂ increases by two orders of magnitude (from 10⁻¹⁰ to 10⁻⁸ kg/m³), the mass of sulfuric, nitric, and nitrous acids deposited onto the Lake Baikal surface a year increases by 7 (from 2.5 to 18 t), 40 (from 0.2 to 6.6 t), and 4 times (from 0.4 to 1.5 t), respectively. As the initial concentration of atomic oxygen O(3P) increases by two orders of magnitude (from 10⁻¹⁴ to 10⁻¹² kg/m³), the mass of the sulfuric acid increases from 0.3 to 1.6 t, the mass of the nitric acid increases from 0.02 to 0.5 t, and that of the nitrous acid increases from 0.05 to 0.2 t. Thus, the initial concentrations of minor atmospheric constituents considerably affect pollution of Lake Baikal.

The results obtained can be used to estimate the contribution of acids falling with precipitation to the total mass of acids deposited onto Lake Baikal through wet and dry deposition.

References

1. M.Yu. Semenov, O.G. Netsvetaeva, N.A. Kobeleva, and T.V. Khodzher, Atmos. Oceanic Opt. 14, Nos. 6-7, 452-457 (2001).
2. O.G. Netsvetaeva, T.V. Khodzher, V.A. Obolkin, N.A. Kobeleva, L.P. Golobokova, I.V. Korovyakova, and M.P. Chubarov, Atmos. Oceanic Opt. 13, Nos. 6-7, 570-573 (2000).
3. V.K. Arguchintsev and V.L. Makukhin, Atmos. Oceanic Opt. 9, No. 6, 509-516 (1996).
4. V.K. Arguchintsev, V.L. Makukhin, V.A. Obolkin, V.L. Potemkin, and T.V. Khodzher, Atmos. Oceanic Opt. 9, No. 6, 472-475 (1996).
5. V.K. Arguchintsev, K.P. Koutsenogii, V.L. Makukhin, V.A. Obolkin, V.L. Potemkin, and T.V. Khodzher, Atmos. Oceanic Opt. 10, No. 6, 370-373 (1997).
6. V.K. Arguchintsev and V.L. Makukhin, Atmos. Oceanic Opt. 11, No. 6, 514-516 (1998).
7. A.L. Malevskii, ed., Official Report "On the State of Environment in Irkutsk Region in 1999," (State Committee of Environmental Protection of Irkutsk Region, 2000), 320 pp.
8. Atmospheric Air Protection: Statistical Bulletin (Regional Statistical Committee, Irkutsk, 2000), 165 pp.
9. Atmospheric Air Protection in 1997 (for Towns and Regions): Statistical Bulletin (Regional Statistical Committee, Irkutsk, 1998), 161 pp.

10. *Problems of Lake Baikal Protection and Nature Management in the Baikal Region* (Gidrometeoizdat, Moscow, 1994), 99 pp.
11. *Monitoring of Lake Baikal* (Gidrometeoizdat, Leningrad, 1991), 262 pp.
12. Meteorological monthly journals. Issue. 22. Part. 2 (USSR State Committee on Hydrology, Meteorology, and Environmental Monitoring, Novosibirsk, 1985–1994), 9096 pp.
13. Meteorological monthly journals. Issue. 23. Part. 2 (USSR State Committee on Hydrology, Meteorology, and Environmental Monitoring, Chita, 1985–1994), 9062 pp.
14. I.L. Karol', V.V. Rozanov, and Yu.M. Timofeev, *Gaseous Admixtures in the Atmosphere* (Gidrometeoizdat, Leningrad, 1983), 192 pp.
15. G. Brasseur and S. Solomon, *Aeronomy of the Middle Atmosphere. Chemistry and Physics of the Stratosphere and Mesosphere* (D. Riedel Publishing Company, Dordrecht, Holland, 1984).
16. G.I. Marchuk and K.Ya. Kondratyev, *Priorities of Global Ecology* (Nauka, Moscow, 1992), 264 pp.
17. C. Dimitroulopoulos and A.R.W. Marsh, *Atmos. Environ.* **31**, No. 18, 3041–3057 (1997).
18. P. Brimblecombe, *Air Composition and Chemistry* (Cambridge University Press, New York, 1986).
19. J. O'M. Bockris, ed., *Environmental Chemistry* (Plenum, New York, 1977).
20. I.L. Karol', M.A. Zatevakhin, N.A. Ozhigina, Yu.E. Ozolin, R. Ramaroson, E.V. Rozanov, and E.N. Stankova, *Izv. Ros. Akad. Nauk, Ser. Fiz. Atmos. Okeana* **36**, No. 6, 778–793 (2000).
21. Yu.M. Gershenzon, S.G. Zvenigorodskii, and V.B. Rozenshtein, *Usp. Khimii* **59**, No. 10, 1601–1626 (1990).
22. V.M. Zakharov, O.K. Kostko, and S.S. Khmelevtsov, *Lidars and Climate Studies* (Gidrometeoizdat, Leningrad, 1990), 320 pp.
23. A.M. Thompson, *J. Atmos. Sci.* **52**, No. 19, 3315–3327 (1995).
24. W. Armerding, M. Spickermann, J. Walter, and F.J. Gomes, *J. Atmos. Sci.* **52**, No. 19, 3381–3392 (1995).
25. R. Imasu, A. Suda, and T. Matsuno, *J. Meteorol. Soc. Jap.* **73**, No. 6, 1123–1136 (1995).
26. V.V. Penenko and A.E. Aloyan, *Models and Methods for Environmental Protection Problems* (Nauka, Novosibirsk, 1985), 256 pp.