

В.К. Аргучинцев, В.Л. Макухин

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИЙ СОЕДИНЕНИЙ СЕРЫ И АЗОТА В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ ЮЖНОГО ПРИБАЙКАЛЯ

С помощью трехмерной нелинейной нестационарной математической модели распространения и трансформации примесей исследовалось вертикальное распределение соединений серы и азота в пограничном слое атмосферы Южного Прибайкалья. Численные эксперименты проводились при типичных метеорологических ситуациях. Выявлено существенное воздействие орографических неоднородностей на распространение примесей в регионе озера Байкал.

Исследование загрязнения пограничного слоя атмосферы над озером Байкал особенно актуально в связи с решением ЮНЕСКО о присвоении Байкалу статуса Участка мирового наследия. Важным методом подобного исследования является математическое моделирование. Обзор работ по использованию моделей распространения и трансформации аэрозолей и газовых примесей на Байкале приведен в [1–2]. Комплексная экологическая модель использовалась для оценки загрязнения атмосферы в регионе оз. Байкал соединениями серы, азота и углерода [3], однако расчеты проводились с шагом сетки по горизонтали 25 км, не позволившем детально учесть орографию рассматриваемого района. С помощью нелинейной нестационарной трехмерной эйлеровой модели [4], верифицированной с использованием данных полевых измерений на Байкале в 1991–1992 гг., было начато изучение процессов распространения и трансформации соединений серы, азота и углерода от промышленных объектов Иркутско-Черемховского промышленного комплекса, Слюдянки и Байкальска, их влияния на оз. Байкал [1–2].

В данной статье основное внимание уделено более полному, эффективному исследованию вертикального распределения соединений серы, азота, углерода, пыли в атмосфере Южного Байкала с помощью математической модели [4], основанной на численном решении трехмерного нестационарного полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии и учитывающей химические взаимодействия 82 веществ. Выбор модели этого типа обусловлен следующими преимуществами.

1. Детерминированные модели имеют более высокую скорость убывания погрешности решения, чем статистические, основанные на методе Монте-Карло.

2. Модели Эйлера не требуют в отличие от моделей Лагранжа интегрирования вдоль пространственной траектории.

3. В эйлеровых моделях орографические неоднородности учитываются достаточно просто, что важно при моделировании процессов в регионе оз. Байкал, где прибрежные области заняты высокими хребтами.

Метод решения подробно изложен в [5].

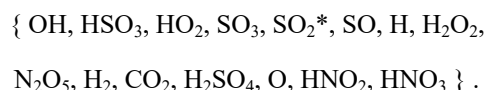
Проведены численные эксперименты, характеризующие распространение атмосферных примесей от промышленных предприятий, расположенных на юге Иркутской области. В рассмотрение были включены промышленные объекты городов: Иркутска, Ангарска, Усолье-Сибирское, Черемхово, Зима, Шелехова, Слюдянка, Байкальска. Учитывались выбросы диоксида серы, оксидов азота, оксида углерода, пыли. Суммарные мощности источников взяты из [6]. Остальные параметры источников предоставлены Иркутским областным комитетом по экологии и природопользованию.

Для моделирования была выбрана область интегрирования площадью  $400 \times 250 \text{ км}^2$  и высотой 3 км над поверхностью оз. Байкал. Шаги по времени и горизонтали составляли соответственно 300 с и 5 км; шаги по вертикали задавались следующим образом:

$$\Delta z = \begin{cases} 50 \text{ м} & \text{для } z \leq 500 \text{ м} \\ 100 \text{ м} & \ll 500 < z \leq 1000 \text{ м} \\ 500 \text{ м} & \ll z > 1000 \text{ м} \end{cases}$$

Коэффициент турбулентной диффузии по вертикали задавался равным  $8 \text{ м}^2/\text{с}$ ; коэффициенты турбулентной диффузии по горизонтали рассчитывались с использованием соотношений полуэмпирической теории турбулентности:  $K_x = (V_0 + \sqrt{V^2/2}) \Delta x$ ;  $K_y = (V_0 + \sqrt{V^2/2}) \Delta y$ . Здесь  $K_x$ ,  $K_y$  – коэффициенты турбулентной диффузии по осям  $x$  и  $y$  соответственно;  $V$  – модуль вектора скорости ветра;  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  – шаги сетки по горизонтальным координатам  $x$  и  $y$ ;  $V_0 = 0,5 \text{ м/с}$ .

Выбрасываются четыре газовых компонента:  $\{\text{SO}_2, \text{NO}_2, \text{NO}, \text{CO}\}$ . В качестве начальных условий для основных составляющих атмосферы – кислорода, азота и водяного пара – и ряда малых газовых примесей задано их фоновое распределение [3, 8–11]. В результате трансформации получаются вещества:



Стехиометрические формулы реакций приведены в [4]. Таким образом, процессы переноса, диффузии и трансформации рассматриваются для 22 газовых компонентов и пыли.

Проведены численные эксперименты при различных метеорологических ситуациях: штиль, преобладание локальных циркуляций – бризов, горнодолинных ветров, совместное действие локальных ветров и фоновго потока, перенос примесей северо-западным ветром с различными скоростями.

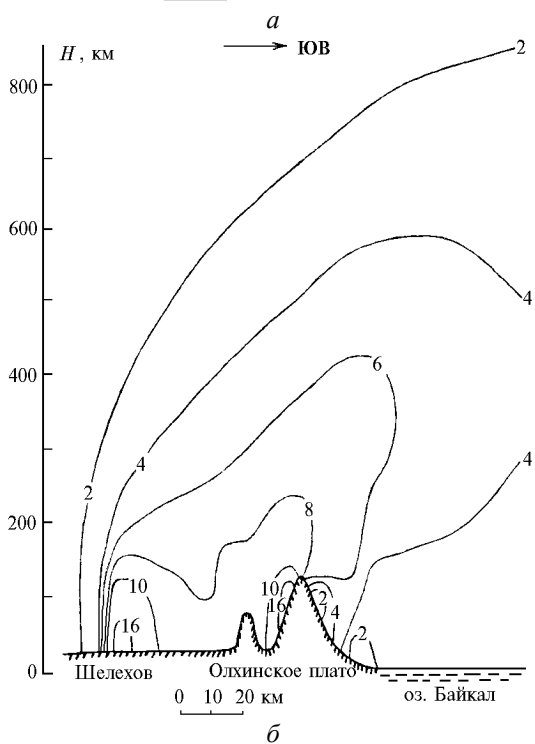
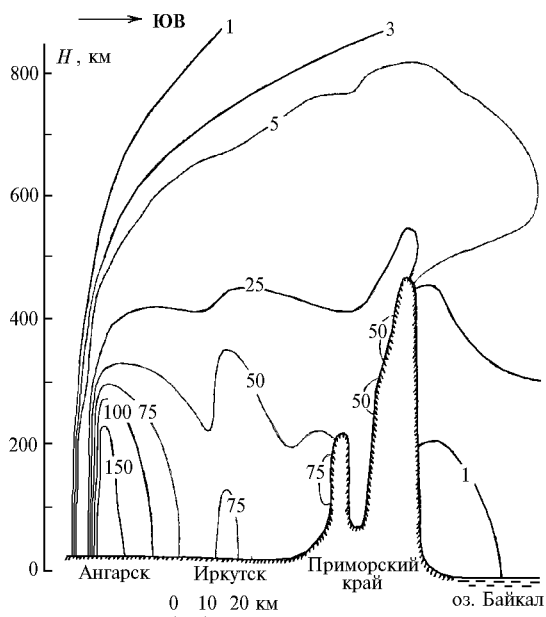


Рис. 1. Изолинии рассчитанных концентраций диоксида серы,  $\text{мкг/м}^3$ , на разрезах: а – Ангарск–Иркутск; б – Шелехов

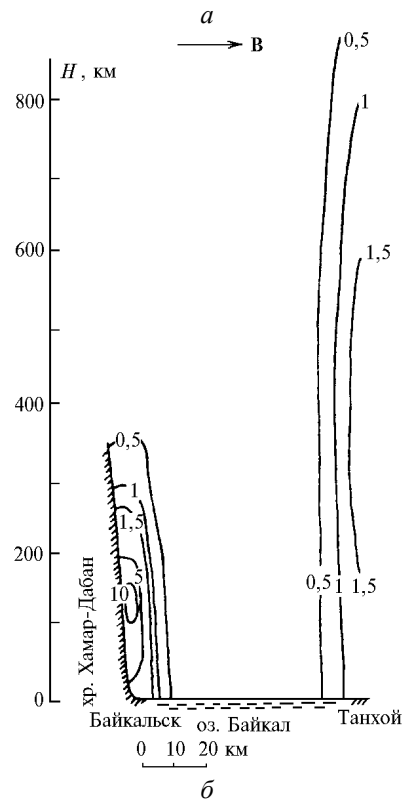
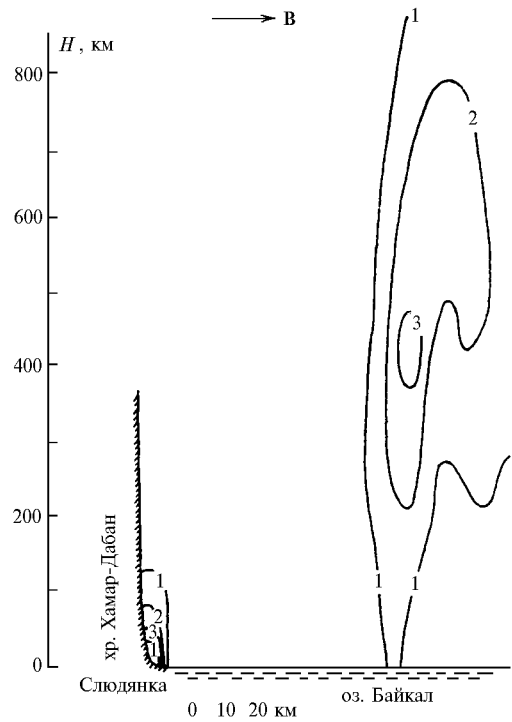


Рис. 2. Изолинии рассчитанных концентраций оксидов азота,  $\text{мкг/м}^3$ , на разрезах: а – Слюдянка; б – Байкальск–Танхой

На рис. 1 представлены вертикальные сечения пограничного слоя атмосферы Южного Прибайкалья при северо-западном ветре скоростью 10 м/с. Тонкими сплошными линиями проведены изолинии концентраций диоксида серы. Сечения выполнены в

направлении с северо-запада на юго-восток, одно – через Ангарск и Иркутск, другое, параллельное первому, – через Шелехов. На наветренных склонах Приморского хребта наблюдаются области локальных максимумов концентраций, а на подветренных, наоборот, минимумов. Значения концентраций  $\text{SO}_2$  на наветренных склонах превышают величины концентраций на подветренных склонах на порядок (рис. 1, *a*). Наибольшие концентрации на высоте 800 м над зеркалом оз. Байкал наблюдаются над вершиной хребта и достигают  $5 \text{ мкг/м}^3$ . На другом сечении (рис. 1, *b*) максимальные концентрации на наветренных склонах превышают соответствующие концентрации на подветренных склонах всего в 4 раза. На высоте 800 м экстремальные значения концентраций находятся над озером, они несколько выше  $2 \text{ мкг/м}^3$ . Следует отметить, что при расчетах не учитывался начальный подъем примеси; его строгое определение связано с принципиальными трудностями выбора соответствующих критериев [7].

На рис. 2 представлены вертикальные сечения, выполненные в направлении с запада на восток, одно – через Слюдянку, другое – через Байкальск и Танхой. Здесь тонкие сплошные линии – изолинии суммы концентраций оксида и диоксида азота. Показано их распространение как от предприятий Слюдянки и Байкальска, так и Иркутско-Черемховского промышленного комплекса, причем максимальные концентрации оксидов в районе Танхой ( $3 \text{ мкг/м}^3$ ), обусловленные переносом по долине Ангары, близки к соответствующим концентрациям над Слюдянкой

( $4 \text{ мкг/м}^3$ ), но значительно меньше, чем над Байкальском ( $10 \text{ мкг/м}^3$ ).

Результаты расчетов показывают, что горные хребты существенно влияют на вертикальное распределение примесей в Южном Прибайкалье. Загрязнение атмосферы на высотах больше 400 м над Байкалом при северо-западном ветре скоростью не менее 10 м/с происходит в основном благодаря выбросам Иркутско-Черемховского промышленного узла.

1. *Аргучинцев В.К., Макухин В.Л., Оболкин В.А.* и др. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. № 6. С. 748–754.
2. *Аргучинцев В.К., Куценогий К.П., Макухин В.Л.* и др. // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. № 6. С. 598–604.
3. *Марчук Г.И., Кондратьев К.Я.* Приоритеты глобальной экологии. М.: Наука, 1992. 264 с.
4. *Аргучинцев В.К., Макухин В.Л.* // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. № 6. С. 804–814.
5. *Аргучинцев В.К.* // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 8. С. 1106–1111.
6. *Государственный доклад о состоянии окружающей природной среды Иркутской области в 1995 году / Удодов Ю.Н.* и др. Иркутск: Гос. комитет по охране окр. среды Иркутской области, 1996. 131 с.
7. *Берлянд М.Е.* Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 448 с.
8. *Пененко В.В., Алоян А.Е.* Модели и методы для задач охраны окружающей среды. Новосибирск: Наука, 1985. 256 с.
9. *Заиков Г.Е., Маслов С.А., Рубайло В.Л.* Кислотные дожди и окружающая среда. М.: Химия, 1991. 141 с.
10. *Мониторинг трансграничного переноса загрязняющих веществ / Израэль Ю.А.* и др. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 304 с.
11. *Израэль Ю.А., Назаров И.М., Прессман А.Я.* и др. Кислотные дожди. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 270 с.

Лимнологический институт СО РАН,  
Иркутск

Поступила в редакцию  
4 февраля 1998 г.

*V.K. Arguchintsev, V.L. Makukhin. Simulation of Vertical Distribution of Sulphur and Nitrogen Compounds Concentration within Atmospheric Boundary Layer over South Baikal Area.*

The vertical distribution of sulphur and nitrogen compounds in a boundary layer of atmosphere of South Baikal area has been investigated using three-dimensional, nonlinear, nonstationary mathematical model for the spreading and transformation of atmospheric admixtures. The numerical experiments were conducted for typical meteorological situations. The considerable influence of orographical heterogeneities on the admixture transfer was revealed.