

В.К. Аргучинцев, В.Л. Макухин, В.А. Оболкин, В.Л. Потемкин, Т.В. Ходжер

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СОЕДИНЕНИЙ СЕРЫ И АЗОТА В ПРИВОДНОМ СЛОЕ ОЗ. БАЙКАЛ

Рассматривается распределение аэрозольных и газовых соединений серы и азота, полученное на основе экспериментальных данных и результатов математического моделирования в регионе оз. Байкал. Проведена серия численных экспериментов для верификации математических моделей переноса атмосферных примесей.

Газообразные и аэрозольные соединения серы и азота являются основными компонентами загрязнения атмосферы не только вблизи промышленных центров, но и в чистых фоновых районах мира. Поэтому возникает необходимость изучения их переноса и химической трансформации в конкретных физико-географических условиях. Подобные исследования представляют особый интерес для байкальского региона как в связи с высокими требованиями к охране его природы, так и в связи с существенной степенью неоднородности природных условий, влияющих на процессы рассеяния примесей. Конечной целью таких работ должно стать создание адекватных математических моделей формирования полей концентраций рассматриваемых атмосферных примесей, что позволило бы прогнозировать состояние воздушной среды в котловине оз. Байкал.

Трансформация соединений серы и азота над оз. Байкал исследовалась в [1] с помощью аналитических моделей, балансовой с элементами статистики [2, 3] и двумерной стационарной диффузионной [4]. Существенным недостатком этих моделей, не учитывающих влияние рельефа, является то, что вертикальное распределение примесей предполагается равномерным.

Регион оз. Байкал характеризуется существенными орографическими и термическими неоднородностями. В данной работе для описания мезометеорологических процессов в связи с отсутствием регулярных наблюдений над водной поверхностью и труднодоступными горными районами предлагается использовать негидростатическую модель без упрощений теории свободной конвекции [5]. Найденные на основе гидротермодинамической модели скорости движения и турбулентные характеристики используются для расчета переноса газовых и аэрозольных примесей с помощью трехмерной нелинейной нестационарной модели [6, 7].

Имеющиеся на сегодняшний день экспериментальные данные о соединениях серы и азота в атмосфере байкальского региона позволяют провести первые оценки адекватности предлагаемых моделей переноса примесей.

В данной статье рассматривается распределение аэрозольных (SO_4^{2-} , NO_3^{-}) и газовых (SO_2 , NO_2) соединений серы и азота, полученное на основе экспериментальных данных и результатов математического моделирования, и проводится их сопоставление. В качестве экспериментальных данных для испытания моделей использовались результаты съемки над акваторией озера, проведенной с борта исследовательского судна летом 1992 г. Аэрозоль отбирался на фильтры «Whatman-41» путем прокачки воздуха центробежным насосом со скоростью 200 л/мин. Время экспозиции составляло от 10 до 20 ч. Химический состав растворимой фракции аэрозоля после экстракции с фильтров бидистиллированной водой определялся: на анионы – методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (хроматограф «Милихром») с погрешностью 4–7%; на катионы – атомноабсорбционным методом (прибор ААС-30) с погрешностью 4–6%.

Измерения концентраций двуокиси серы и азота в приводном слое атмосферы велись с помощью корреляционного масспектрометра, сконструированного в Центральной аэрологической обсерватории (г. Москва) [8]. Калибровка прибора регулярно осуществлялась установкой на пути принимаемого излучения (рассеянная солнечная радиация) оптической квар-

цевой кюветы с известным содержанием газа. Прибор аттестован с погрешностью 10% для SO₂ в диапазоне интегрального содержания газа по трассе от 5 до 500 ppm·m и 15% для NO₂ в диапазоне от 5 до 150 ppm·m. Одновременно с измерениями регистрировались метеоданные и дальность видимости.

Съемка проводилась в июне – июле 1992 г. практически по всей акватории озера. Всего отобрано и проанализировано 227 проб аэрозоля и проведено 64 серии (в каждой по 10 – 15 отсчетов по различным направлениям) измерений газовых примесей (SO₂, NO₂). В табл. 1 представлены средние характеристики ионного состава аэрозолей и концентрации газовых примесей по трем котловинам озера, а также особо – на участке акватории вблизи г. Байкальска, являющегося вместе с Байкальским целлюлозно-бумажным комбинатом (БЦБК) наиболее крупным антропогенным источником аэрозоля на побережье озера.

Таблица 1

Средние значения массовых концентраций сульфатов, нитратов, диоксидов серы и азота в байкальском аэрозоле по районам озера, мкг/м³

| Район | SO ₄ ²⁻ | NO ₃ ⁻ | SO ₂ | NO ₂ |
|----------------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------|-----------------|
| Северный Байкал | 0,4 | 0,1 | 3—11 | 1—3 |
| Средний Байкал | 0,3 | 0,2 | 3—10 | 1—2 |
| Южный Байкал | 0,4 | 0,3 | 5—15 | 2—5 |
| Вблизи г. Байкальска | 1,6 | 0,7 | 10—40 | 2—10 |

Проведена серия численных экспериментов для верификации математической модели переноса соединений серы и азота по данным экспедиционных наблюдений в регионе оз. Байкал. В рассмотрение были включены промышленные объекты городов – Иркутск, Ангарск, Усолье-Сибирское, Черемхово, Зима, Шелехов, Байкальск. Данные об интенсивности источников предоставлены Иркутским областным комитетом по экологии и природопользованию.

Для моделирования была выбрана область интегрирования площадью 400 × 250 км² и высотой 1 км над подстилающей поверхностью. Шаги по времени и горизонтали составляли соответственно 300 с и 5 км; шаги по вертикали задавались следующим образом:

$$\Delta z = \begin{cases} 50 \text{ м} & \text{для } z \leq 150 \text{ м} \\ 150 & \text{--- } 150 < z \leq 300 \\ 200 & \text{--- } 300 < z \leq 500 \\ 500 & \text{--- } z > 500 \end{cases}$$

Расчеты проводились для периодов 6–7 июня и 24–27 июня 1992 г. в пограничном слое атмосферы Южного Байкала.

Таблица 2

Усредненные концентрации SO₄²⁻ и NO₃⁻

| Дата | Время усреднения (местное), ч | Место установки фильтра | Концентрация SO ₄ ²⁻ , мкг/м ³ | | Относительная погрешность | Концентрация NO ₃ ⁻ , мкг/м ³ | | Относительная погрешность |
|-------------|-------------------------------|----------------------------|---|-------------|---------------------------|--|-------------|---------------------------|
| | | | измеренная | вычисленная | | измеренная | вычисленная | |
| 6.06 | 7–15 | Байкальск | 3,9 | 2,45 | -0,37 | 0,75 | 0,55 | -0,27 |
| 6.06–7.06 | 22–6 | Утулик | 4,11 | 2,82 | -0,31 | 0,49 | 0,62 | 0,27 |
| 24.06 | 7–21 | Култук | 1,56 | 1,55 | 0,01 | 0,19 | 0,10 | -0,47 |
| 25.06 | 7–16 | Култук–Байкальск | 0,74 | 0,86 | 0,16 | 0,16 | 0,14 | -0,12 |
| 25.06–26.06 | 19–17 | Байкальск–Мурино–Байкальск | 2,17 | 1,74 | -0,20 | 0,58 | 0,35 | -0,40 |
| 26.06 | 7–21 | Байкальск | 2,56 | 3,50 | 0,37 | 0,83 | 0,65 | -0,22 |
| 26.06–27.06 | 21–6 | Байкальск–середина озера | 4,92 | 3,14 | -0,36 | 1,30 | 0,65 | -0,50 |

В регионе Байкала у подстилающей поверхности 6–7 июня преобладало малоградиентное барическое поле, вызвавшее развитие преимущественно антициклонических циркуляций, отмечались хорошо выраженные бризовые эффекты. Погода 24–25 июня определялась глубо-

ким циклоном, смещавшимся с северо-запада на юго-восток. При прохождении теплого сектора циклона ветер над Южным Байкалом имел юго-западное направление, при прохождении холодного сектора – северо-западное. 26 июня установилось малоградиентное барическое поле, отмечались локальные циркуляции.

В табл. 2 приведены результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных.

Коэффициенты корреляции между расчетными и измеренными концентрациями имеют значения: 0,7 для сульфатов и 0,8 для нитратов. Относительные ошибки не превосходили для сульфатов 40%, а для нитратов 50%, при этом средние квадратические отклонения этих ошибок составляли соответственно 30 и 25 %. Наибольшие отклонения рассчитанных значений концентраций от экспериментальных связаны с влиянием удаленных источников.

Результаты численных экспериментов для типичных метеорологических ситуаций от БЦБК и предприятий г. Слюдянка представлены на рис. 1–3.

Эксперимент 1. Над Южным Байкалом устанавливается малоградиентное барическое поле, преобладает безветренная погода. На рис. 1, а представлены изолинии поля рассчитанных значений приземных концентраций двуокиси серы в долях среднесуточной предельно допустимой концентрации (ПДК), равной $0,05 \text{ мг/м}^3$. На всех рисунках изолинии проведены через 0,1 среднесуточной ПДК соответствующего ингредиента. В непосредственной близости от источников выбросов возникают области повышенных концентраций. Вокруг Слюдянки и Байкальска площадь превышения значения среднесуточной ПДК двуокиси серы составляет соответственно 20 и 5 км^2 .

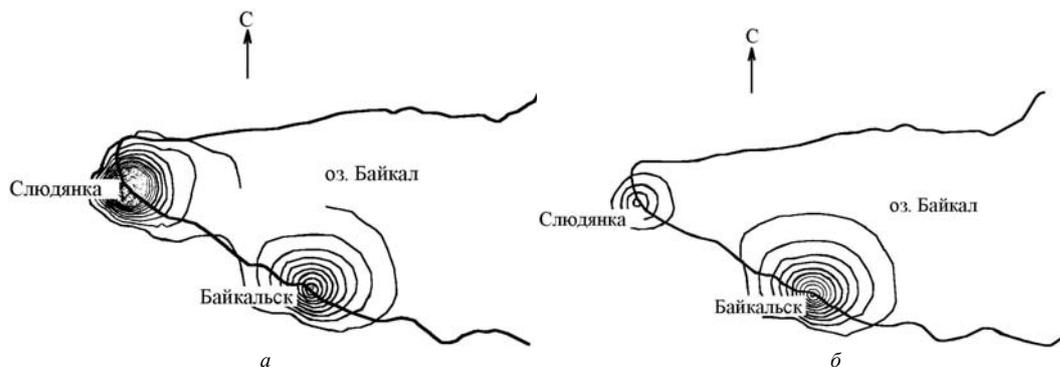


Рис. 1. Изолинии концентраций при штиле: а – SO_4^{2-} , б – NO_x

Эксперимент 2. Преобладающим ветром является западный, при котором происходит перенос примесей на акваторию озера (рис. 2, а). В ближайшей окрестности источников выбросов концентрации двуокиси серы уменьшаются по сравнению с экспериментом 1.

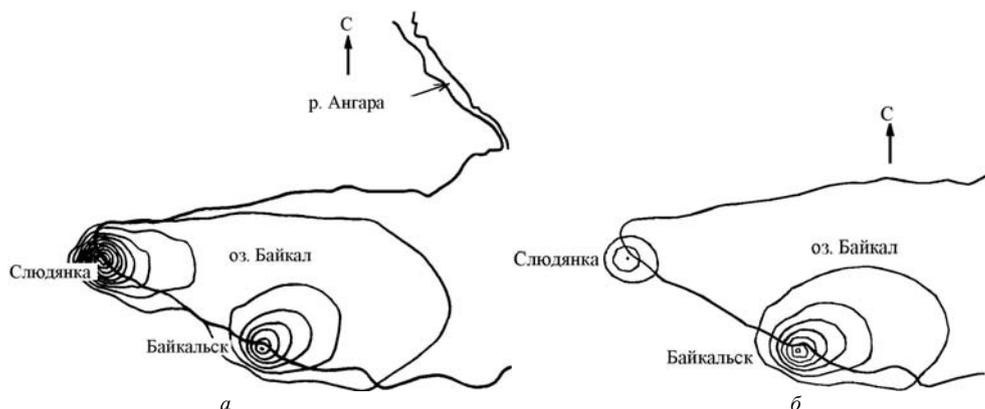


Рис. 2. Изолинии концентраций при западном ветре: а – SO_4^{2-} , б – NO_x

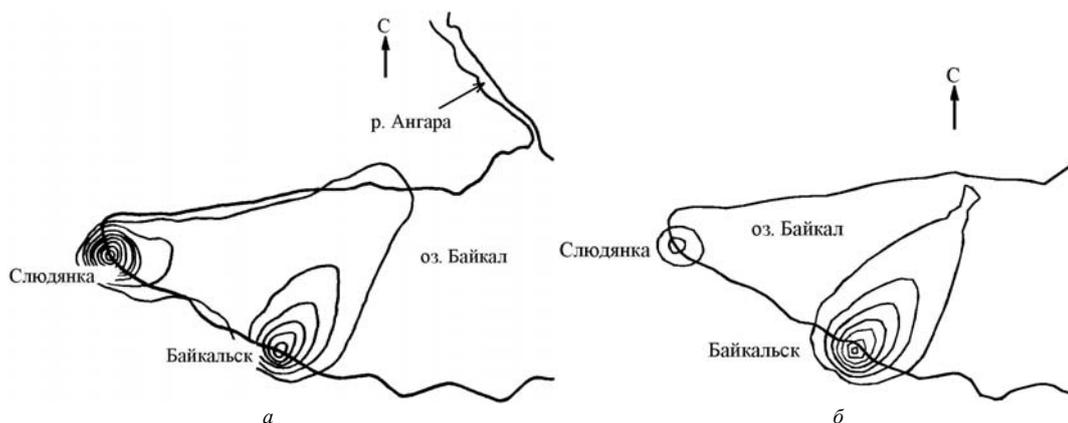


Рис. 3. Изолинии концентраций при юго-западном ветре: *a* – SO_4^{2-} , *б* – NO_x

Эксперимент 3. Преобладающим ветром является юго-западный. Выбросы предприятий Слюдянки и Байкальска почти полностью осаждаются на открытой поверхности озера, достигая противоположного берега в концентрациях, равных 0,1 среднесуточной ПДК двуокиси серы (рис. 3, *a*).

Эксперименты 4–6. Исследовалось распространение двуокиси азота над Южным Байкалом при тех же типах ветрового поля, что и в экспериментах 1–3. Рис. 1, *б* – 3, *б* иллюстрируют распределение концентраций NO_x при безветренной погоде, при западном и юго-западном типах ветра соответственно, с превышением среднесуточной ПДК = 0,04 мг/м³ только при штиле в Байкальске на площади 5 км².

Обобщая результаты проведенных исследований, отметим следующее. Из анионов преобладающими везде являются сульфаты, гидрокарбонаты и хлориды. Однако их взаимное соотношение в разных котловинах различается. В южной котловине содержание сульфатов существенно повышено по сравнению с другими анионами. Кроме того, здесь отмечаются более повышенный средний фон всех ионов по сравнению с другими котловинами и более высокая изменчивость сульфатов, что связано с дополнительным вкладом антропогенных источников, которые в основном и сосредоточены в южной части озера.

Съемка, проведенная по акватории вблизи наиболее мощного из них – г. Байкальска, показывает значительное превышение здесь концентраций рассматриваемых ионов по сравнению со средним фоном южной котловины. В этом районе отличается и соотношение ионов в аэрозоле. Так, среди анионов существенное превышение над остальными имеют сульфаты и хлориды.

Среди катионов на первое место выходит натрий. Такой состав ионов вблизи БЦБК связан с применением в технологии производства целлюлозы специфических веществ: NaOH , Cl_2 , ClO_2 , H_2SO_4 . Интересно, что в среднем для южной части озера ионы натрия и хлоридионы существенно не выделяются по массовой концентрации по сравнению с другими ионами. Это может означать, что основной вклад атмосферных выбросов завода приходится на крупные фракции аэрозоля, которые оседают вблизи источника.

Проведенные ранее исследования химического состава атмосферных осадков показали, что дождевые воды в этом районе становятся сульфатно-натриевыми в отличие от гидрокарбонатно-кальциевых, характерных для остальной части Байкала [9].

Будучи предшественниками сульфатного и нитратного аэрозолей, газы SO_2 и NO_2 в своем пространственном распределении выявляют районы антропогенного загрязнения, в которых наблюдается и высокое содержание ионов SO_4^{2-} и NO_3^- в аэрозоле (см. табл. 1). Вдоль р. Ангары от Байкала до Иркутска концентрации NO_2 возрастают, оставаясь ниже предельно допустимых значений для населенных пунктов. В средней части озера двуокись азота часто не регистрировалась в связи с низкими концентрациями (ниже порога обнаружения).

Проведенная верификация математической модели переноса примесей в атмосфере позволяет уже на данном этапе провести типизацию метеорологических ситуаций и атмосферных загрязнений в регионе оз. Байкал.

Работа выполнена при финансовой поддержке ИНТАС (грант N 93-182).

1. Кудрявцева Л.В., Устинова С.И. // Мониторинг и оценка состояния Байкала и Прибайкалья. Л.: Гидрометеоздат, 1991. С. 86–92.
2. Fisher V. E. A. // Atmosph. Environ. 1983. V. 17. P. 1865–1880.
3. Verikatram A. // Atmosph. Environ. 1986. V. 20. P. 1317–1324.
4. Fay J. A. and Rosenzweig J. J. // Atmosph. Environ. 1980. V. 14. P. 355–365.
5. Аргучинцев В.К., Аргучинцева А.В. // Моделирование процессов гидросферы, атмосферы и ближнего космоса. Новосибирск: Наука, 1985. С. 79–84.
6. Аргучинцев В.К. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. N 8. С. 1106–1111.
7. Аргучинцев В.К., Макухин В.Л. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. N 6. С. 804–814.
8. Чаянова В.А., Шайков М.К. // Тр. ЦАО. 1986. В. 161. С. 43–48.
9. Вотинцев К.К., Ходжер Т.В. // География и природные ресурсы. 1981. N 4. С. 28–36.

Лимнологический институт СО РАН,
г. Иркутск

Поступила в редакцию
26 января 1996 г.

V.K. Arguchintsev, V.L. Makukhin, V.A. Obolkin, V.L. Potemkin,
T.V. Khodzher. **Sulphur and Nitrogen Compounds Distribution within Above-water Layer of Lake Baikal.**

The distribution of sulphure and nitrogen aerosol and gase compounds in Baikal region are discussed using the experimental data and the computer simulations. A series of numerical experiments for verification of mathematical models of the atmospheric admixtures transfer is conducted.