

В.Л. Потемкин, В.Л. Макухин

Математическое моделирование процессов аэрозольного загрязнения в регионе озера Байкал

Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск

Поступила в редакцию 12.11.2004 г.

Выполнена количественная оценка величины осаждения тяжелых металлов — шестивалентного хрома, марганца и оксида меди на поверхность Южного Байкала за год. Определен вклад отдельных источников выбросов в загрязнение Южного Байкала и Байкальского заповедника выбранными токсикантами. Выявлено существенное влияние рельефа на перенос тяжелых металлов в исследуемом регионе.

Введение

Проблема загрязнения окружающей среды в результате антропогенного воздействия в настоящее время является очень актуальной как у нас в стране, так и за рубежом. Примеси, выбрасываемые промышленными предприятиями и автотранспортом, не только вызывают необратимые процессы в природных средах («мертвые» озера, не подлежащие восстановлению почвы и др.), но и оказывают крайне негативное влияние на жизнедеятельность людей. Некоторые вещества, такие как диоксиды серы и азота, будучи выброшены в атмосферу, участвуют в образовании кислот и солей кислот, т.е. сульфатов и нитратов. Вместе с воздушными массами эти вещества могут переноситься на десятки, сотни, а иногда и тысячи километров и, оседая под действием гравитации и выпадая с осадками в виде кислотных дождей, увеличивают кислотность почв, воды в водоемах и водотоках, что приводит к угнетению и гибели растений и водных обитателей, животных, вызывает различные заболевания у человека.

Многие тяжелые металлы, накапливаясь в органах и мышечных тканях людей и животных, вызывают серьезные заболевания, а иногда приводят к смерти. Соединения свинца, такие как тетраэтилсвинец и другие, вызывают заболевания головного мозга, приводят к психическим расстройствам у детей, поражают центральную нервную систему. У человека избыток концентрации хрома вызывает серьезные онкологические заболевания, избыток концентрации марганца — костные болезни.

Количественная оценка величины осаждения шестивалентного хрома, марганца и оксида меди на поверхность Южного Байкала в различные сезоны года

Основные источники поступления тяжелых металлов в атмосферу — сжигание угля, автомобильный транспорт, сталелитейное производство. В золе

электростанций, промышленных и бытовых топок тяжелых металлов значительно больше, чем в почве.

Обычно тяжелые металлы и их соединения находятся в воздухе в виде мелкодисперсных субмикронных частиц диаметром 0,5–1 мкм. Вместе с воздушными массами эти летучие частицы могут переноситься на значительные расстояния (1000 км и более [1]). Попадая из атмосферы в водоем, оседая на почву, соединения тяжелых металлов оказывают негативное действие на животных и растения и, в конечном итоге, через пищевые продукты на человека. Важной задачей поэтому является определение величины выпадения этих токсикантов не только вблизи источников выбросов, но и на поверхность водоемов.

Решение этой проблемы с помощью измерений не представляется возможным: для корректной оценки потребуются синхронные инструментальные исследования на всей акватории озера с хорошим горизонтальным разрешением, что, конечно, является слишком дорогостоящим мероприятием. Более просто оценить массу выпадающих за исследуемый период металлов и их соединений можно с помощью математической модели распространения примесей. Подобные работы проводились ранее для других регионов. Исследование распространения тяжелых металлов над Европой было выполнено с помощью моделей дальнего переноса [1, 2]. Предпринимались попытки оценки антропогенных потоков ряда микроэлементов из атмосферы на зеркало оз. Байкал [3] на основе простых балансных соотношений и аналитических решений [4]. Для оценки вклада 15 основных промышленных источников, расположенных в регионе оз. Байкал, в загрязнение северной части озера пылью и тяжелыми металлами [5] использовалась простая траекторная модель [6–9].

Нами исследовались процессы распространения и осаждения шестивалентного хрома, марганца и оксида меди в регионе Южного Байкала с помощью нестационарной пространственной эйлеровой модели, учитывающей влияние рельефа местности [10–12]. Источниками выбросов являлись промышленные предприятия и индустриальные ком-

плексы, расположенные в долинах рр. Ангара и Селенга, на побережье Южного Байкала и в районе оз. Гусиное. Характеристики источников задавались на основе данных инвентаризации [13–19]. Метеорологическая информация была получена путем статистической обработки данных измерений гидрометеорологических станций [20, 21].

Численные эксперименты проводились в области площадью 500×250 км 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 над уровнем Байкала он равнялся 50 м, далее – 200, 1000, 1500 и 2000 м. Коэффициенты турбулентной диффузии рассчитывались с использованием соотношений полуэмпирической теории турбулентности [22].

С помощью рассчитанных на каждом временном шаге значений концентраций исследуемых тяжелых металлов была определена плотность массового расхода этих токсикантов в исследуемой области при работе каждого источника в отдельности и при их совместном действии. Значение скорости гравитационного осаждения частиц было взято из [23]. Результаты расчетов представлены на рис. 1–3 и в табл. 1, 2.

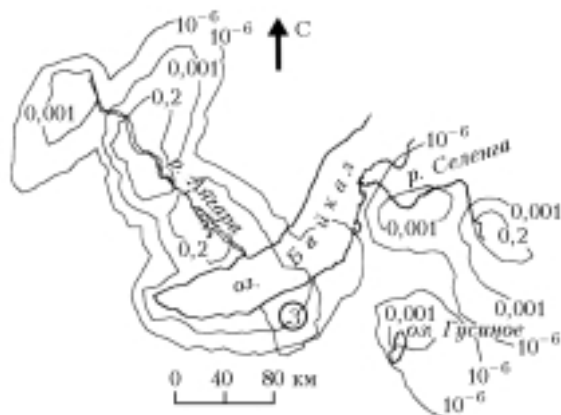


Рис. 1. Изолинии плотности массового расхода Cr на подстилающей поверхности региона Южного Байкала, $\text{кг}/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$. (3) – территория Байкальского заповедника

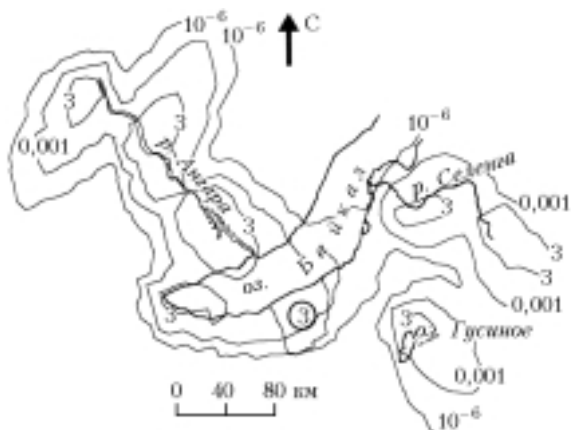


Рис. 2. Изолинии плотности массового расхода Mn на подстилающей поверхности региона Южного Байкала, $\text{кг}/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$



Рис. 3. Изолинии плотности массового расхода CuO на подстилающей поверхности региона Южного Байкала, $\text{кг}/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$

Таблица 1

Вклад Cr, Mn, CuO в загрязнение Южного Байкала (сухое осаждение из атмосферы), %

Источник выбросов	Вклад за год, %		
	Cr	Mn	CuO
Ангарск	7	1,5	3
Шелехов	17	21	72
Иркутск	74	60	20
Слюдянка	1,5	16	3
Байкальск	0,5	1,5	2

Рис. 1–3 иллюстрируют распределения рассчитанных полей плотности массового расхода шестивалентного хрома, марганца и оксида меди у подстилающей поверхности рассматриваемого региона за год. Наибольшие значения потоков тяжелых металлов отмечены вблизи основных источников выбросов, расположенных в долинах Ангары и Селенги.

Рассматриваемая область включает территорию Байкальского государственного заповедника площадью 1657 км^2 [24], образованного в 1969 г. на южном побережье (между рр. Мишиха и Выдринная) в центральной части хребта Хамар-Дабан. На северных склонах хребта преобладает темнохвойная тайга из пихты и кедра. Ближе к гольцовой зоне доминируют заросли кедрового стланика, рододендрона и субальпийские луга, выше – кустарниковые и лишайниковые тундры. Всего во флоре заповедника 745 видов растений, много реликтовых (например, тополь душистый из неогенового периода) и эндемичных форм. Животный мир заповедника – типичный горно-таежный, в составе фауны 37 видов млекопитающих, 260 видов птиц. Заповедники являются наиболее эффективной формой охраны природы, основное их назначение – служить эталоном нетронутой или хорошо сохранившейся природы и быть местом изучения хода естественных природных процессов и явлений. На их территории запрещается всякая хозяйственная деятельность, нарушающая естественное развитие природных комплексов, поэтому исследование процессов

распространения, трансформации и осаждения выбросов промышленных предприятий над особо охраняемыми территориями Прибайкалья будет способствовать решению задач охраны экосистемы оз. Байкал.

Определялся вклад в загрязнение Байкальского заповедника исследуемыми тяжелыми металлами каждого источника в отдельности (сухое осаждение из атмосферы) (табл. 2).

Таблица 2

Источник выбросов	Вклад за год, %		
	Сг	Мп	СuO
Ангарск	10	2	5
Шелехов	16	24	74
Иркутск	74	72	21
Слюдянка	<0,1	2	<0,1

Определена масса исследуемых тяжелых металлов (кг), выпадающая на поверхность Южного Байкала площадью 9000 км² и Байкальский заповедник за год. Соответствующие величины представлены в табл. 3.

Таблица 3

Южный Байкал			Байкальский заповедник		
Сг	Мп	СuO	Сг	Мп	СuO
7	72	3	2	17	0,7

С целью оценки влияния рельефа на осаждение тяжелых металлов в регионе Южного Байкала были проведены численные эксперименты при наличии рельефа местности и без него, т.е. осаждение на гладкую подстилающую поверхность. Получено, что окружающие озеро горные хребты (Приморский, Байкальский, Хамар-Дабан и др.) оказывают существенное влияние на перенос тяжелых металлов. При отсутствии рельефа на Южный Байкал осаждалось бы на 30% больше массы этих токсикантов, чем при наличии рельефа, а на Байкальский заповедник – на 10% больше.

Заключение

Таким образом, проведенные расчеты и выполненные по ним оценки показали, что основной вклад в загрязнение Южного Байкала Сг и Мп вносят предприятия Иркутска: 74 и 60% соответственно. Менее весом вклад предприятий Шелехова (17 и 21% соответственно). Наибольший вклад (72%) в загрязнение Южного Байкала СuO вносят источники выбросов в г. Шелехове. Влияние Иркутска значительно меньше (20%). Основной вклад в загрязнение Байкальского государственного заповедника Сг и Мп вносят предприятия Иркутска: 74 и 72%. Вклад предприятий г. Шелехова – 16 и 24% соответственно. Наибольший вклад в загрязнение заповедника СuO вносят источники выбросов г. Шелехова – 74%. Менее весом вклад предприятий Иркутска – 21%.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке концепций эффективной эксплуатации рекреационных ресурсов региона оз. Байкал, а также для улучшения экологической обстановки региона при регулировании и режима работы предприятий.

1. *Heavy metals in the atmosphere* // Options. 1991. Sept. P. 11–12.
2. *Bartnicki J.* An Eulerian model for atmospheric transport of heavy metals over Europe: Model description and preliminary results // Water, Air, and Soil Pollut. 1994. V. 75. N 3–4. P. 227–263.
3. *Анохин Ю.А., Остромогильский А.Х., Пословин А.Л., Хицкая Е.В.* Оценка антропогенного потока микроэлементов из атмосферы на зеркало оз. Байкал // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 1981. Т. IV. С. 32–40.
4. *Rodhe H.* A study of sulphur budget for the atmosphere over Northern Europe // Tellus. 1972. V. 24. N 2. P. 128–137.
5. *Анохин Ю.А., Кокорин А.О., Прохорова Т.А., Анисимов М.П.* Аэрозольное загрязнение атмосферы над озером Байкал и влияние на него промышленных источников // Мониторинг состояния озера Байкал. Л.: Гидрометеониздат, 1991. С. 44–50.
6. *Гальперин М.В.* Модель для расчета дальнего трансграничного переноса соединений серы в атмосфере (выпадения и концентрации) // Тр. ИПГ. 1988. Вып. 71. С. 9–14.
7. *Израэль Ю.А., Назаров И.М., Прессман А.Я., Рошинский Ф.Я., Рябошапка А.Г.* Кислотные дожди. Л.: Гидрометеониздат, 1989. 270 с.
8. *Giorgi F.* A particle dry-deposition parametrisation scheme for use in the trace transport models // J. Geoph. Res. D. 1986. V. 91. N 9. P. 9794–9806.
9. *Sievering H.* Small particles dry deposition on natural waters: How large the uncertainty? // Atmos. Environ. 1984. V. 18. N 11. P. 2271–2272.
10. *Аргунищев 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.
11. *Аргунищев 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.
12. *Makukhin V.L., Potemkin V.L.* Numerical simulation of air pollution above the southern Baikal area with local winds // Proc. SPIE. 2000. V. 4341. P. 580–585.
13. *Охрана атмосферного воздуха.* Статистический бюллетень. Иркутск: Облкомстат, 2000. 165 с.
14. *Охрана атмосферного воздуха за 1997 год (в разрезе городов и районов).* Статистический бюллетень. Иркутск: Гос. комитет РФ по статистике, 1998. 161 с.
15. *Природные ресурсы и охрана окружающей среды.* Статистический бюллетень за 1994 год. Иркутск: Гос. комитет РФ по статистике, 1995. 131 с.
16. *Государственный доклад о состоянии окружающей природной среды Иркутской области в 1996 году* / Гл. ред. Ю.Н. Удодов. Иркутск: Гос. комитет по охране окр. среды Иркутской области, 1997. 231 с.
17. *Государственный доклад о состоянии окружающей природной среды Иркутской области в 1995 году* / Гл. ред. Ю.Н. Удодов. Иркутск: Гос. комитет по охране окр. среды Иркутской области, 1996. 131 с.

18. *Государственный доклад. Экологическая обстановка в Иркутской области в 1994 году* / Под ред. А.Л. Малевского. Иркутск: Иркутский обл. комитет по охране окр. среды и природных ресурсов Минприроды РФ, 1995. 198 с.
19. *Экологическая обстановка в Иркутской области в 1993 г. Ежегодный доклад*. Иркутск: Иркутский обл. комитет по охране окр. среды и прир. ресурсов, 1994. 204 с.
20. *Метеорологические* ежемесячники. Вып. 22. Ч. 2. Новосибирск: Зап.-Сиб. регион. вычисл. центр, 1985–1994. 8645 с.
21. *Метеорологические* ежемесячники. Вып. 23. Ч. 2. Чита: Забайкальск. тер. упр. по гидрометеорологии и контролю природн. среды, 1985–1994. 8640 с.
22. *Аргуинцев 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.
23. *Barrie L.A.* Aspects of atmospheric pollutant origin and deposition revealed by multielemental observations at a rural location in Eastern Canada // *J. Geophys. Res.* D. 1988. V. 93. N 4. P. 3773–3788.
24. *Мониторинг* состояния озера Байкал. Л.: Гидрометеониздат, 1991. 262 с.

V.L. Potemkin, V.L. Makukhin. Mathematical simulation of the processes of aerosol pollution in the Lake Baikal region.

The annual deposition of heavy metals (hexavalent chromium, manganese, and copper oxide) on the surface of Lake Baikal was estimated. The impact of toxicants from some sources of emission on the pollution level of Southern Baikal and Baikal Preserve was determined. Significant influence of terrain on the transfer of heavy metals was revealed in the studied region.