

УДК 546.49:628.113(571.53)

**АНТРОПОГЕННАЯ КОМПОНЕНТА И БАЛАНС РТУТИ  
В ЭКОСИСТЕМЕ БРАТСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА**© 2003 г. П. В. Коваль, Г. В. Калмычков, С. М. Лавров, Ю. Н. Удодов,  
Е. В. Бутаков, Ф. В. Файфилд, В. И. Алиева

Представлено академиком В.А. Жариковым 07.06.2002 г.

Поступило 07.06.2002 г.

Балансовые расчеты являются одним из наиболее продуктивных подходов при исследовании круговоротов вещества и энергии в природно-техногенных экосистемах. И даже в тех случаях, достаточно обычных для расчетов подобного рода, когда расхождение оценок намного превышает 100%, они могут служить эффективным инструментом анализа геохимических циклов, выбора дальнейшего направления исследований и принятия практических решений. Продуктивность данного подхода особенно очевидна при геохимическом изучении водохранилищ, испытывающих переменную антропогенную нагрузку.

Братское водохранилище (БВ) принадлежит к числу крупнейших долинных водохранилищ мира. Оно занимает ключевое положение в Ангаро-Енисейской водной системе. Более половины притока (62–65%) БВ приходится на чистейшие воды оз. Байкал. В то же время в бассейне БВ и непосредственно на его побережье размещены основные промышленные комплексы Иркутской области, в том числе два химических комбината, Усольехимпром и Саянскхимпром, использующие ртуть и ее соединения при производстве хлора, каустика и винилхлорида [1].

Поступление ртути в окружающую среду за время работы комбинатов превысило 3450 т. По масштабам это сопоставимо с наиболее опасными очагами техногенного ртутного загрязнения в мире. Существенная часть “техногенной” ртути распространялась также вниз по течению в Усть-Илимское водохранилище [1]. В 1998 г. был закрыт главный техногенный источник поступления ртути в водохранилище – цех ртутного электролиза на комбинате Усольехимпром, что коренным образом сказалось на балансе техногенных потоков ртути в системе БВ. Однако по-прежнему

сохраняются крупные запасы ртути, накопленные на промплощадке комбината и в донных отложениях БВ. В несопоставимых масштабах, но продолжается поступление ртути в БВ в связи с работой производства, использующего ртутные катализаторы.

В настоящем сообщении приводятся первые оценки бюджета ртути в БВ в период 1973–1998 гг. – время наиболее интенсивного поступления ртути, а также в период снижения антропогенной нагрузки после остановки ртутного электролиза на комбинате Усольехимпром (2001 г.). Приходная и расходная части баланса получены как сумма годовых потоков поступления и выноса ртути из водохранилища. Последние были рассчитаны на основе оценок концентрации и мощности потоков, определение которых представляло существенные затруднения в связи с отсутствием представительных данных государственного мониторинга. Поэтому расчеты основывались главным образом на результатах, полученных нами и нашими коллегами в период 1992–2001 гг. [1, 2 и др.], включая мониторинг ртути в воде байкальского стока. При отсутствии соответствующих прямых определений (обмен с атмосферой) либо очевидной некорректности предшествующих оценок (боковой приток), использовались также данные по балансам потоков ртути в Сибири [3–5], оз. Байкал [6]. Оценка водного баланса р. Ангары взята из [7, 8]. В расчете варианта 2001 г. были использованы результаты наших работ 2001 г., выполненных на спаде летнего паводка (август–сентябрь), что дает основания рассматривать данные оценки как наиболее “оптимистичные” в отношении ртутного загрязнения экосистемы БВ.

Процедуры пробоотбора и анализа, а также результаты межлабораторного контроля приведены в [1, 9]. Анализ ртути в воде проводился атомно-абсорбционным методом “холодного пара” с предварительным концентрированием ртути. В 2000–2001 гг. параллельно использовался также атомно-флуоресцентный детектор PSA 10.023 Merlin, что

*Институт геохимии им. А.П. Виноградова  
Сибирского отделения Российской Академии наук,  
Иркутск  
Kingston University, Kingston upon Thames, UK*

**Таблица 1.** Баланс ртути в Братском водохранилище

Составляющие	Резервуары и потоки	1973–1998 гг. (среднегодовой)			2001 г.		
		концентрация, мкг/л, мкг/кг	приход, кг/год	расход, кг/год	концентрация, мкг/л, мкг/кг	приход, кг/год	расход, кг/год
Поверхностный приток <sup>1</sup> (р. Ангара)	57.7 (км <sup>3</sup> /год)	0.0052	300		0.0041	237	
Боковой приток <sup>2</sup>	29.34 (км <sup>3</sup> /год)	(0.03)	(880)		(0.03)	(880)	
Поверхностный сток	87.04 (км <sup>3</sup> /год)	0.036	–	3133	0.005	–	435
Промышленные и бытовые сбросы <sup>3</sup>	~1.0 (км <sup>3</sup> /год)	(~0.5)	(~500)		(~0.5)	(~500)	
Усольехимпром			3311			(100)	
Саянскимпром			548			548	
Влажное осаждение	5500 км <sup>2</sup>	3.7 (г/км <sup>2</sup> · год) [6]	(20)		3.7 (г/км <sup>2</sup> · год) [6]	(20)	
Сухое осаждение	5500 км <sup>2</sup>	4 (г/км <sup>2</sup> · год) [5]	(22)		4 (г/км <sup>2</sup> · год) [5]	(22)	
Эмиссия в атмосферу	5500 км <sup>2</sup>	4 (г/км <sup>2</sup> · год) [5]		(22)	4 (г/км <sup>2</sup> · год) [5]		(22)
Выведение в осадок	0.00157 (км <sup>3</sup> /год)	960 (сухой осадок)		2412	(~600)		(~1500)
Вылов рыбы <sup>4</sup>	(~180 т)	480		(~1)	480		(~1)
Всего			5581	5568		2307	1958
Разница				–13 –0.2%			–349 –15%

Примечание. <sup>1</sup> Сток Иркутского водохранилища. <sup>2</sup> Включает поверхностный смыв и снеговую воду. <sup>3</sup> Ориентировочная оценка на основании данных ежегодных докладов о состоянии окружающей среды Иркутской области и [10] без комбинатов Усольехимпром и Саянскимпром. <sup>4</sup> Приблизительная, очевидно заниженная, оценка, основывающаяся на статистике доперестроечного периода и возможном вкладе неконтролируемого лова. Вклад биогенного вывода ртути из водного тела БВ, безусловно, пренебрежимо мал по сравнению с другими потоками, однако имеет принципиальное экологическое значение. Оценки, требующие первоочередного уточнения, заключены в скобки.

позволило снизить предел обнаружения ртути до 0.0005 мкг/л.

Результаты расчетов приведены в табл. 1. Отдавая должное элементу случайности, следует отметить, что неплохая сбалансированность обоих расчетов, вероятнее всего, свидетельствует о реалистичности оценок преобладающих техногенных потоков ртути в экосистеме и согласованности аналитических данных.

В отличие от глобального цикла в круговороте ртути в экосистеме БВ, безусловно, преобладают техногенные источники и потоки. В период работы цеха ртутного электролиза доля антропогенной компоненты в балансе ртути Братского водохранилища составляла не менее 90% и в 2001 г. по-прежнему превосходила природную составляющую. Это резко превышает средние данные для Сибири [5]. Прекращение ртутного электролиза на ОАО “Усольехимпром” привело к суммарному снижению эмиссии ртути в водохранилище более чем вдвое и к почти 4-кратному уменьшению притока ртути из техногенных источников при почти 30-кратном снижении доли комбината Усольехимпром. Отношение техногенных потоков ртути к природным существенно уменьшилось. Рез-

ко возросла доля ртути, выводимой в осадок, а сброс ртути из БВ в Усть-Илимское водохранилище понизился примерно в 7 раз, что свидетельствует о повышении “относительной эффективности” седиментационного геохимического барьера БВ. Снижение среднего содержания ртути в воде БВ до значений, меньших, чем ПДК в воде объектов, используемых для рыбохозяйственных целей (0.01 мкг/л), свидетельствует об улучшении экологической ситуации. Однако накопленные на промплощадках и в донных отложениях БВ запасы ртути по-прежнему остаются потенциально опасными [1].

С ликвидацией самого крупного техногенного источника эмиссии ртути стала очевидной необходимость более детального исследования других техногенных источников (ртутные катализаторы, ТЭЦ, муниципально-индустриальные сбросы, использование ртутьсодержащих пестицидов, эмиссия от накопленных запасов ртути на промплощадках и т.д.) и природных потоков ртути (боковой приток, обмен с атмосферой и затопленными грунтами, биотическая компонента). Балансовый анализ выявил также важность выделения аномальных техногенных потоков тяжелых металлов

даже в тех случаях, когда их интенсивность находится заведомо в пределах ошибки расчета общего баланса. Это особенно актуально для потоков высоко токсичных форм химических элементов, таких, например, как монометилртуть. Так, ориентировочная оценка годового поступления метилированной формы ртути в пищевые цепи населения с официально вылавливаемой в БВ рыбой (объем вылова, вероятнее всего, занижен) дает величину порядка 3 млн. предельно допустимых недельных доз (согласно рекомендациям ВОЗ [11]).

Таким образом, геохимические циклы пресноводных природно-техногенных систем, находящихся подобно БВ в условиях значительной антропогенной нагрузки, являются нестабильными и весьма чувствительными к изменению техногенной обстановки. Последнее может приводить к принципиальным изменениям в их геохимических балансах и, в частности, как это имело место в БВ, к заметному улучшению экологической ситуации. Однако накопление в отдельных резервуарах (донные отложения, промплощадки и др.) запасов токсичных веществ создает экологические “бомбы замедленного действия” с трудно предсказуемыми последствиями. С экологической точки зрения важно также выявление специфических потоков высокотоксичных соединений, даже если их доля в общем балансе является незначительной.

Авторы признательны Л.Д. Андрулайтис, выполнившей большой объем аналитических работ.

Работа была поддержана РФФИ (гранты 99-05-64162, 01-05-97236, 02-05-65295), Экологическим фондом “Know How” (SEPS project 13), программами СО РАН и “Глобальные изменения окружающей среды”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проблемы ртутного загрязнения природных и искусственных водоемов, способы его предотвращения и ликвидации / Под ред. П.В. Ковалю, М.И. Кузьмина: Тез. докл. Междунар. конф., 13–16 сентября 2000 г. Иркутск: Ин-т геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, 2000. 115 с.
2. Koval P.V., Kalmychkov G.V., Gelety V.F. et al. // J. Geochim. Explor. 1999. V. 66. № 1/2. P. 277–289.
3. Sukhenko S.A., Vasiliev O.F. In: Global and Regional Mercury Cycles: Sources, Fluxes and Mass Balances. Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1996. P. 123–134.
4. Yagolnitsker M.A., Sokolov V.M., Ryabtsev A.D. et al. In: Global and Regional Mercury Cycles: Sources, Fluxes and Mass Balances. Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1996. P. 429–440.
5. Белеванцев В.И., Оболенский А.А., Аношин Г.Н. и др. // Геология и геофизика. 2000. Т.41. № 4. С. 578–582.
6. Leermakers M., Meuleman C., Baeyens W. In: Sources, Fluxes and Mass Balances. Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1996. P. 303–316.
7. Иванов И.Н. Гидроэнергетика Ангары и природная среда. Новосибирск: Наука, 1991. 129 с.
8. Князев А.Д., Безруков Л.А., Кузнецов Г.И. Ангара – дочь Байкала. Иркутск: ПФ “Улисс”, 1994. 224 с.
9. Koval P.V., Kalmychkov G.V., Gelety V.F., et al. In: Lake Baikal – A Mirror in Time and Space for Understanding Global Change Processes. Amsterdam: Elsevier, 2000. P. 165–175.
10. Янин Е.П. Ртуть в окружающей среде промышленного города. М.: ИМГРЭ, 1992. 168 с.
11. WHO. Environmental Health Criteria 101: Methylmercury. Geneva: WHO, 1990. P. 78–83.