



УДК 504.054(571.53)

Биогеохимические особенности миграции ртути в системе «почва – растение» Южного Прибайкалья

О. Н. Гордеева, Г. А. Белоголова, Л. Д. Андрулайтис

Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН, Иркутск
E-mail: gordeeva@igc.irk.ru

Аннотация. Изучены особенности распределения ртути в почвах и растениях в черте г. Усолье-Сибирское (Иркутская область) и его окрестностей. На фоне повышенных содержаний ртути в лесных почвах установлено увеличение накопления этого металла растениями и высшими грибами, что может быть обусловлено значительным содержанием ртути в органических формах. Тем не менее, эти показатели не превышают санитарно-гигиенических норм.

Ключевые слова: ртуть, формы нахождения, биодоступность, растения, высшие грибы, Усольехимпром, Южное Прибайкалье.

Введение

Ртуть является одним из наиболее опасных элементов – загрязнителей биосферы. Негативное воздействие ртути на живые организмы связано с её способностью блокировать белковые молекулы, нарушать их биосинтез, вызывать мутагенные изменения в ДНК, подавлять рост и ускорять старение растений [8; 9; 22]. Особенно опасны ртутьорганические комплексы, так как они намного токсичнее и активно захватываются живыми организмами, в том числе высшими растениями. Образованию органических соединений ртути, в том числе метилртути, способствуют микроорганизмы. Эти процессы интенсивно протекают в почвах и водоёмах [9; 13; 14].

Летучесть ртути и некоторых ртутных соединений способствует перераспределению её между всеми компонентами биосферы. Пары элементарной ртути, постоянно поступающие в атмосферу из природных и техногенных источников, переходят в твёрдую фазу, сорбируются на мелкодисперсных частицах и участвуют в различных процессах [13]. В связи с высокой токсичностью соединений ртути для живых организмов, особенно при наличии ртутных техногенных аномалий вблизи или на территории проживания человека, большую актуальность представляют комплексные биогеохимические исследования, позволяющие проследить пути миграции этого элемента в различных компонентах биосферы и оценить возможность включения его в пищевую цепь человека.

Особенности миграции ртути в почвах и её бионакопления в природно-техногенных условиях Южного Прибайкалья рассмотрены на примере влияния химического производства ООО «Усольехимпром», который является одним из основных источников ртутного загрязнения окружающей среды региона. До 1998 г. получение хлора и щёлочи на производстве осуществлялось ртутным способом, в результате чего в почвах под промышленной площадкой цеха ртутного электролиза (ЦРЭ) образовалось техногенное месторождение, содержащее, по разным оценкам, 345–500 т ртути [5]. Расположение производства близ р. Ангары способствовало миграции ртути в водную среду, накоплению её в донных отложениях и гидробионтах [2; 19; 20]. Заметный вклад в ртутное загрязнение окружающей среды региона вносят также выбросы предприятий ТЭК и использование ядохимикатов.

Целью настоящей работы стало изучение особенностей миграции и степени биодоступности ртути в почвах и произрастающих на них сосудистых растениях и грибах на территории, подверженной влиянию ртутного загрязнения ООО «Усольехимпром».

Материалы и методы

Материалами для настоящего исследования послужили дерновые лесные и дерново-карбонатные почвы, отобранные на различном расстоянии от техногенного источника ртути, локализованного под промплощадкой ЦРЭ на территории «Усольехимпром». Опробованы

лесные почвы в радиусе 1,5–3 км от ЦРЭ, а также в окрестностях г. Усолъе-Сибирское на расстоянии до 8 км от городской черты. Изучены пахотные почвы дачных и приусадебных участков, а также условно-фоновые пахотные почвы в 30 км от города. Все почвы отобраны методом конверта на участках площадью 10×10 м на корнеобитаемую глубину – 0–35 см в лесной

зоне и 0–15, 0–20 см из пахотного горизонта ($A_{\text{пах}}$).

В почвах на территории «Усо́льехимпром» и в окрестностях Усо́лье-Сибирского кроме валового содержания ртути изучены также формы её нахождения согласно методике [31] (табл. 1).

Таблица 1

Краткая схема экстрагирования форм ртути из почв [31]

Фракция	Экстрагент	Характеристика извлекаемых соединений ртути	Типичные растворимые соединения
1	Дистиллированная вода	Водорастворимые	HgCl_2
2	0,1 М CH_3COOH + 0,01 М HCl , pH = 2	Кислоторастворимые	HgO , HgSO_4
3	1 М NaOH	Органокомплексы	Гуматы Hg, метилртуть CH_3Hg
4	12 М HNO_3	Прочносвязанные	В решётке минералов-носителей, Hg_2Cl_2 , Hg^0
5	Царская водка	Сульфиды	HgS , HgSe

Данная методика фракционирования форм ртути была разработана и впервые применена для последовательного извлечения их из почв. Методики, использующиеся в настоящее время для экстракции форм других тяжёлых металлов (Tessier [33], BCR [28; 32] и др.), для ртути неприемлемы в силу её особенных физико-химических свойств [21]. Согласно методике [31], в две первые фракции – водо- и кислоторастворимую – переходят наиболее растворимые и подвижные в почвах соединения ртути. В последующих фракциях, получаемых при использовании более сильных экстрагентов, извлекается ртуть, связанная в органические комплексы почв, находящаяся в решётке минералов и в виде слаборастворимых сульфидов.

В настоящем исследовании методика [31] использовалась с некоторой корректировкой: к навеске почвы в 1 г добавляли 50 мл экстрагента, подвергали встряхиванию в течение 5 ч, затем настаивали в течение 20 ч при комнатной температуре. В трёхкратной повторности центрифугировали и фильтровали раствор с промыванием. Полученные растворы объединяли в одну пробу. Указанные процедуры выполняли для каждой последующей фракции. Начиная со второй фракции, экстрагент добавляли к оставшемуся от предыдущей фракции сухому осадку.

Органические формы ртути, получаемые в соответствующей фракции, включают ртуть, связанную с гумусовыми веществами почвы в виде гуматов ртути, а также метилртуть. Гуматы ртути образуются при её взаимодействии с

гуминовыми кислотами, которые, согласно современным представлениям, делятся на свободные и связанные. В то же время мнение о нерастворимости гуминовых кислот и их производных в определённой степени условно в связи с недостаточностью точных данных [15].

Таким образом, в миграционных циклах ртути важную роль играют органические соединения, от растворения и биологического разрушения которых зависит подвижность этого металла. Кроме того, известно, что биодоступность и биоаккумуляция ртутьорганических соединений значительно выше, чем её минеральных форм [9]. Изучение доступности различных форм ртути для растений даёт дополнительную информацию о включении этого элемента-токсиканта в пищевую цепь человека.

Сопряжённо с почвами изучались дикорастущие растения. Каждая проба включала несколько растений одного вида, отобранных на участке размером 10×10 м. Древесные и древесно-кустарниковые виды представлены берёзой повислой *Betula pendula* L., ивой белой *Salix alba* L., ивой козьей *S. caprea*. Среди трав изучены паслён сладко-горький *Solanum dulcamara* L., кровохлёбка аптечная *Sanguisorba officinalis* L., герань луговая *Geranium pratense* L., горошек мышиный *Vicia cracca* L., косяника каменная (листья) *Rubus saxatilis* L., осока мохнатая *Carex hirta* L., осот огородный *Sonchus oleraceus* L., тысячелистник обыкновенный *Achillea millefolium* L., хвощ лесной *Equisetum sylvaticum* L. У древесных растений

изучали листья, одно- и двухлетние ветви нижней части кроны, у травянистых растений – надземную часть. На дачных и приусадебных участках одновременно с почвами отбирались клубни картофеля, а также корнеплоды и, частично, ботва моркови.

На участках, где были отобраны почвы и дикорастущие растения, собраны плодовые тела пластинчатых и трубчатых грибов (*Lactarius torminosus*, *L. pubescens*, *L. resimus*, *L. necator*, *Russula betularum*, *R. adusta*, *Leccinum scabrum*). Ввиду того, что количество грибов одного вида часто было недостаточно для анализа, грибы всех видов объединялись в две (отдельно трубчатые и пластинчатые) объединённых пробы с каждого участка. Всего изучены грибы с девяти участков: 6 – на территории «Усольехимпром», 3 – в окрестностях г. Усолье-Сибирское.

Почвы и растения высушивались при комнатной температуре до воздушно-сухого состояния. Грибы подвергались сушке при температуре не выше 30 °С. Все образцы почв (включая вытяжки), растений и грибов анализировались на содержание ртути методом

атомной абсорбции на анализаторе РА-915+ (Люмэкс, Россия). Предел обнаружения данного метода для почв, растений и грибов составляет 0,005 мг/кг (вал), для вытяжек из почв – 0,0005 мг/кг.

Результаты и обсуждение

Распределение ртути в почвах. Полученные данные, отражающие содержания ртути в почвах (горизонты $A_0 + A$, A_{max}) г. Усолье-Сибирское и его окрестностей, представлены в табл. 2.

Наиболее высокие концентрации этого элемента установлены в верхнем гумусовом горизонте почв, который можно рассматривать как геохимический барьер для ртути. При этом даже в максимально загрязнённой почве, отобранной вблизи ЦРЭ на территории «Усольехимпром», содержания ртути не превышают ПДК, но на порядок выше регионального фона и повышены относительно кларков (табл. 3). В нижней части почвенного профиля этих участков концентрации металла снижаются до фоновых (рис. 1, А). Такая же ситуация выявлена и в лесной зоне окрестностей Усо́лья-Сибирского (рис. 1, В).

Таблица 2

Содержание ртути в почвах на территориях ООО «Усольехимпром», г. Усолье-Сибирское и его окрестностей, мг/кг

Место отбора проб	Среднее	Минимальное	Максимальное
Территория «Усольехимпром», $n = 20$ ¹	0,274	0,006	0,770
Смешанный лес в окрестностях города, $n = 5$	0,205	0,061	0,466
Приусадебные и дачные участки ² , $n = 10$	0,046	0,013	0,081
Условно-фоновые пахотные почвы ³ , $n = 17$	0,035	0,016	0,078

Примечание: ¹ n (здесь и далее) – количество проб; ²г. Усолье-Сибирское; ³в 30 км от города

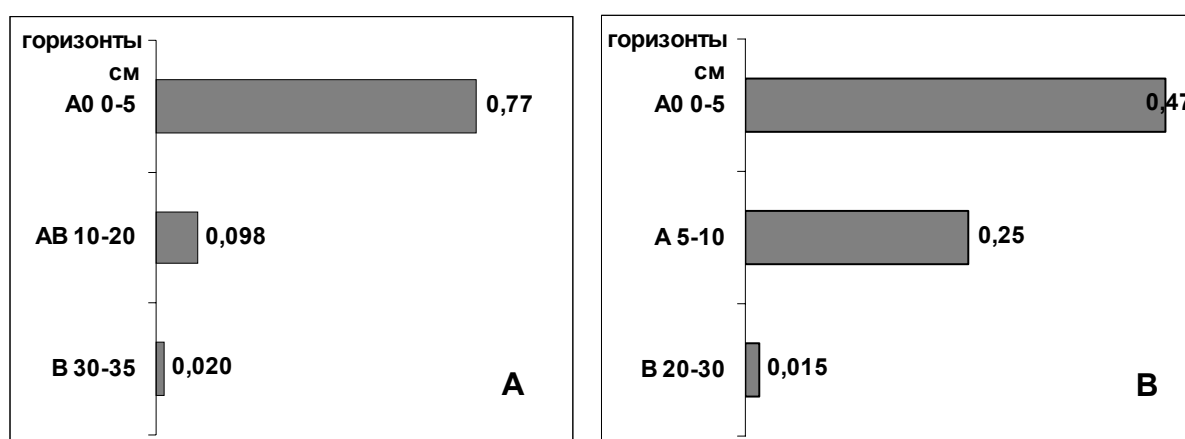


Рис. 1. Распределение ртути по горизонтам почв, мг/кг: А – территория «Усольехимпром» на удалении 1,5 км от ЦРЭ, В – смешанный лес в окрестностях Усо́лья-Сибирского

Сельскохозяйственные почвы в черте г. Усолье-Сибирское содержат значительно меньше ртути, несмотря на относительно близкое (2–3 км) расположение «Усольехимпрома» к частному сектору города. Показатели содержания ртути в этих почвах хорошо сопоставимы с таковым в пахотных почвах условно-фонового участка и находятся в пределах обычных содержаний для почв данной категории [29], но остаются повышенными относительно регионального фона (табл. 3).

Таблица 3
Нормативы содержания ртути в почвах, мг/кг

Региональный фон [3]	0,02
Кларк [8]	0,12±0,02
Обычное в пахотных почвах [29]	0,01–1
Предельно допустимое в пахотных почвах [29]	2,0
ПДК [11]	2,1

По всей видимости, в данном случае имеет место узколокальное загрязнение почв на территории «Усольехимпрома» вблизи основного техногенного источника – ЦРЭ. Распространен-

ние ртути на более дальние расстояния может происходить под влиянием предприятий топливно-энергетического комплекса: известно, что ртуть как примесь содержится в углях, при сжигании которых значительная её часть улетучивается [17; 26]. По-видимому, загрязнение ртутью лесных почв в окрестностях Усолья-Сибирского происходит не только под влиянием «Усольехимпрома», но также за счёт выбросов ТЭЦ–11, расположенной вблизи участка леса, где были отобраны образцы почвы. Поступающая от различных источников ртуть включается в биогеохимический круговорот – из подстилки поступает в почву и растения, а затем с растительными остатками возвращается в почву.

В целом загрязнение почв ртутью на урбанизированных территориях является общей тенденцией. Так, в пределах городских поселений Сибири часто выявляются локальные участки с аномально высокими концентрациями ртути в почвах (табл. 4), превышающими не только кларки, но и предельно допустимые нормы (см. табл. 3).

Таблица 4
Содержание ртути в почвах ряда городов Сибири, мг/кг

Место отбора, горизонт	Среднее	Минимальное	Максимальное
Свирск, A ₀ + A [4]	0,224	0,011	4,56
Черемхово, A [12]	0,059	0,006	0,271
Иркутск, A ₀ + A [23]	0,095	0,003	2,675
Якутск, A [25]	0,042	0,010	1,0
Новосибирск, A _{пах} [1]	0,075	0,032	0,187

Полученные в настоящем исследовании максимальные показатели содержания ртути в почвах техногенной зоны Усолья-Сибирского ниже, чем в почвах таких городов, как Свирск и Якутск. Однако, согласно данным П. В. Ковалева и соавторов [18], максимальные концентрации этого металла в почвах, непосредственно прилегающих к ЦРЭ на «Усольехимпроме», достигали 125 мг/кг – 900 г/кг. Эти показатели значительно выше максимальных концентраций ртути в почвах ртутных рудников и рудных тел в США (до 40 мг/кг), а также в почвах Великобритании (3,8 мг/кг) и Канады (5,7 мг/кг) в районах расположения аналогичных хлорно-щелочных или химических производств [9]. Сравнение сельскохозяйственных почв показало, что средние величины содержания ртути в горизонте A_{пах} почв в окрестностях Усолья-Сибирского и условно-фонового участка ниже, чем в том же горизонте почв в Новосибирске

[1]. Это может быть связано с некоторой удалённостью дачных и приусадебных участков Усолья-Сибирского от территории «Усольехимпрома», в то время как в Новосибирске пахотные почвы опробовались на территориях, прилегающих к промышленным производствам.

Формы нахождения ртути в почвах. Как показали исследования, ртуть в верхнем горизонте A изученных почв находится преимущественно в виде органической и прочносвязанной фракций (табл. 5). Это свидетельствует о достаточно прочном удержании ртути компонентами почв. Важную роль здесь играют почвенные гумусовые вещества. Высокое содержание ртути в органической фракции указывает на то, что значительная часть этого металла находится в почвах в виде ртутьорганических комплексов. Максимальные их концентрации установлены в лесных почвах окрестностей Усолья-Сибирского.

Таблица 5

Распределение ртути в почвах на территориях ООО «Усольехимпром», г. Усолье-Сибирское и его окрестностей по фракциям, мг/кг (% от вала)

Фракции ¹	Участки			
	1,5 км от ЦРЭ ² гор. А ₀ + А	2 км от ЦРЭ гор. А ₀ + А	Лес ³ гор. А ₀ + А	Условный фон ⁴ гор. А _{нах}
Фр. 1 _{вод.}	0,0073 (0,95)	0,0055 (0,84)	0,0019 (0,47)	0,0015 (2,27)
Фр. 2 _{кисл.}	0,003 (0,34)	0,0065 (0,99)	0,0028 (0,70)	0,0007 (1,06)
Фр. 3 _{орг.}	0,183 (23,8)	0,110 (16,8)	0,245 (61,1)	0,027 (40,9)
Фр. 4 _{прочн.}	0,160 (20,8)	0,601 (91,7)	0,151 (37,6)	0,037 (56,0)
Фр. 5 _{сульф.}	< 0,0001 (0,013)	0,005 (0,76)	< 0,0001 (0,025)	< 0,0001 (0,15)
∑ фр.	0,353 (45,84)	0,728 (110)	0,401 (86,0)	0,066 (84,6)
Вал	0,770 (100)	0,655 (100)	0,466 (100)	0,078 (100)

Примечание: ¹Фракции (Фр.): 1_{вод.} – водорастворимая, 2_{кисл.} – кислоторастворимая, 3_{орг.} – органическая, 4_{прочн.} – прочносвязанная, 5_{сульф.} – сульфидная, ∑ фр. – сумма фракций; ²цех ртутного электролиза (ЦРЭ); ³окрестности Усоля-Сибирского; ⁴в 30 км от города

Концентрации ртути в наиболее подвижных формах, полученных в водо- и кислоторастворимой фракциях, незначительны. Тем не менее, прослеживается тенденция снижения содержания ртути в водорастворимой фракции по мере удаления от ЦРЭ. В такой же последовательности убывают её валовые содержания в почвах. Количество ртути в максимально закрепленной фракции – сульфидной – ниже предела обнаружения, за исключением единственного участка на территории «Усольехимпром» (см. табл. 5).

Подобные результаты получены при изучении почв Новосибирска [1], где показано, что ртуть в них находится преимущественно в виде труднорастворимых соединений. Доля ртути, связанная с органическими веществами (экстракт 0,1 н NaOH), достаточно высока и со-

ставляет 30–40 %, что подтверждает значимость гумусовых веществ почвы в процессах миграции этого элемента.

Распределение ртути в дикорастущих растениях. Результаты исследования свидетельствуют о том, что бионакопление ртути определяется многими факторами – видовой принадлежностью растений, особенностями строения различных их органов, показателями валового содержания и различием форм нахождения ртути в почвах. Несмотря на то, что концентрации ртути в отдельных видах растений не всегда прямо пропорциональны значениям её валовых содержаний в почвах, в целом прослеживается тенденция повышенного бионакопления этого металла на более загрязнённых участках (табл. 6–8).

Таблица 6

Содержание ртути в древесных растениях, произрастающих на территории ООО «Усольехимпром» и в окрестностях Усоля-Сибирского (сухая масса), мг/кг

Вид растения		Среднее	Минимальное	Максимальное
территория «Усольехимпром»				
Берёза <i>Betula pendula</i> L.	листья, n = 7	0,032	0,023	0,060
	ветви, n = 6	0,013	0,008	0,019
Ива <i>Salix alba</i> L., <i>S. caprea</i> L.	листья, n = 6	0,034	0,016	0,072
	ветви, n = 4	0,010	0,007	0,016
окрестности Усоля-Сибирского				
Берёза <i>Betula pendula</i> L.	листья, n = 4	0,029	0,014	0,066
	ветви, n = 3	0,007	0,005	0,008

Таблица 7

Содержание ртути в травянистых растениях, произрастающих на территории ООО «Усольехимпром» и в окрестностях Усоля-Сибирского (сухая масса), мг/кг

Пункт сбора ¹	Среднее	Минимальное	Максимальное
УХП-1, n = 5	0,081 (0,106) ²	0,040 (0,052)	0,161 (0,209)
УХП-2, n = 4	0,045 (0,069)	0,018 (0,027)	0,070 (0,107)
Окрестности, n = 4	0,082 (0,176)	0,037 (0,079)	0,132 (0,283)

Примечание: ¹УХП («Усольехимпром»): 1 – в 1,5 км от ЦРЭ, 2 – в 2 км от ЦРЭ. Окрестности – смешанный лес в окрестностях города; ²здесь и далее в скобках указаны коэффициенты биологического поглощения

Содержание ртути в грибах, произрастающих на территории ООО «Усольехимпром» и в окрестностях Усоля-Сибирского (сухая масса), мг/кг

Место сбора	Среднее	Минимальное	Максимальное
«Усольехимпром», $n = 7$	1,24 (14,9)	0,137 (3,35)	5,40 (30,8)
Окрестности города, $n = 3$	0,518 (5,9)	0,341 (2,21)	0,70 (8,43)

Ветви древесных растений накапливают ртути меньше, чем их листья: разница в содержаниях достигает одного порядка. По-видимому, это обусловлено как физиологическими особенностями различных органов растений, так и оседанием ртутьсодержащей пыли на поверхности листьев [10] и способностью их тканей поглощать пары ртути непосредственно из атмосферного воздуха. На наличие такого механизма накопления указывают ряд исследователей [12; 27]. Кроме того, в листьях может накапливаться ртуть, поступающая в растение из почвы. В целом концентрации этого элемента в листьях изученных деревьев и кустарников выше кларка для растений (0,015 мг/кг сухого вещества [10]), особенно на территории «Усольехимпром».

Повышенное бионакопление ртути характерно и для травянистых растений, в наземной биомассе которых концентрации этого металла в 1,2–10,7 раз выше кларка (табл. 7). Относительно естественного уровня (до 0,1 мг/кг [9]) содержание ртути повышено в травах некоторых видов – тысячелистнике обыкновенном (0,161 мг/кг), отобранном на территории «Усольехимпрома», и герани луговой (0,132 мг/кг), произраставшей в лесной зоне окрестностей города. Указанные виды трав используются в народной медицине для лечения и профилактики различных заболеваний. Полученные данные подтверждают, что использование в лекарственных целях растений, произрастающих в окрестностях химических предприятий, крайне нежелательно.

Другой особенностью распределения ртути в травах является близкое или повышенное содержание этого элемента в собранных в окрестностях города растениях относительно таковых с территории предприятия. Значения коэффициента биологического поглощения (Кб) подтверждают более интенсивное накопление ртути травянистыми растениями в окрестностях города (см. табл. 7).

Причин этого явления может быть несколько. Как указывалось ранее, источниками ртути для почв окрестностей города являются не только предприятие «Усольехимпром», но также ТЭЦ–11. Ртуть, поступающая с атмосферными выбросами ТЭЦ, связывается минеральными и органическими компонентами лесных почв, что создаёт дополнительную техногенную нагрузку на почвенно-растительный покров территории.

Другой причиной накопления ртути в травах может являться повышенное содержание этого элемента в органической фракции почв в окрестностях города (см. табл. 5). Дальнейшие исследования показали прямую зависимость между содержанием ртути в органической фракции почв и в травах (рис. 2). Этого не наблюдается для других её фракций и валовых содержаний в почвах. Полученные данные косвенно могут свидетельствовать о важной роли почвенных органических соединений ртути в процессах её миграции в системе «почва – растение», что требует, однако, дополнительного изучения.

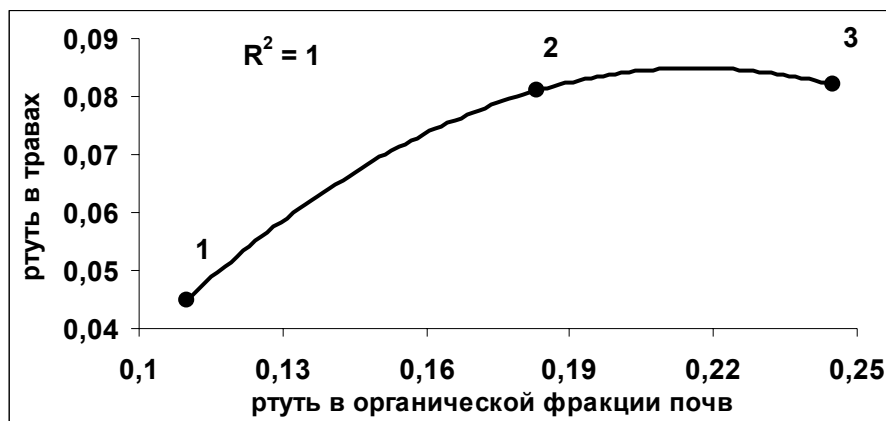


Рис. 2. Соотношение содержания ртути в органической фракции почв и в травах, мг/кг. Участки: 1 – в 1,5 км от ЦРЭ, 2 – в 2 км от ЦРЭ, 3 – окрестности города

Распределение ртути в высших грибах. В отличие от древесных и травянистых растений, высшие грибы можно отнести к организмам-аккумуляторам ртути (см. табл. 8). Способность грибов накапливать различные тяжёлые металлы (ТМ), особенно легколетучие (Hg, Cd, Se, Cu, Zn), известна давно [7; 9; 30 и др.] и определяется ростом плодовых тел грибов на мицелии, простирающемся в верхнем слое почвы на сотни метров. Вся поверхность мицелия всасывает питательные вещества, которые затем поступают в карпофоры [24].

Кроме того, известно, что ТМ накапливаются преимущественно в белковых организмах, к которым относятся и грибы. Это свойство, которое можно рассматривать как механизм закрепления и детоксикации, обусловлено способностью ТМ образовывать связи с сульфгидрильными группами специфических белков – металлотионеинов [6].

Техногенное загрязнение приводит к многократному увеличению содержания элементов-токсикантов в этих организмах, что видно на примере грибов, отобранных на территории «Усольехимпрома» и в окрестностях Усо́лья-Сибирского. На этих участках содержание ртути в плодовых телах грибов на 1–2 порядка выше, чем в почвах. Для сравнения: среднее содержание ртути в грибах, собранных в Усть-Ордынском Бурятском округе, где отсутствуют химические производства, составляет 0,186 мг/кг (в почвах – 0,01 мг/кг). В то же время количество ртути в грибах из окрестностей городов и парков Швейцарии достигало 33,6 мг/кг сухой массы [9].

На интенсивное накопление ртути грибами указывают также высокие значения Кб, особенно на территории «Усольехимпрома» (см. табл. 8). Согласно классификации Б. Б. Полюнова и А. И. Перельмана [16], ртуть относится к элементам среднего биологического захвата.

Однако, как показали исследования, в отношении грибов, выросших в условиях техногенного загрязнения, этот металл переходит в группу элементов сильного и энергичного накопления. Интересной закономерностью является снижение значений Кб ртути грибов при росте содержания этого металла в почве, что свидетельствует об ограничении поступления ртути в грибы при возрастании её содержания в почвах. Подобные тенденции, рассмотренные как на примере грибов, так и высших растений, отмечены в ряде исследований [6; 9].

Таким образом, для грибов, как и для древесно-травянистой растительности, сохраняется тенденция загрязнения ртутью вблизи урбанизированных территорий. В этой связи не рекомендуется употребление в пищу грибов, собранных в окрестностях г. Усо́лье-Сибирское, особенно на территориях, подверженных выбросам предприятий «Усольехимпром» и ТЭЦ–11.

Распределение ртути в овощах. Концентрации ртути в сельскохозяйственных растениях, выращенных в черте города и на условно-фоновом участке (табл. 9), значительно ниже допустимых норм (табл. 10). Однако сравнение с фоновыми концентрациями для овощей [13] и характеристиками картофеля, выращенного на побережье оз. Байкал, указывает на некоторое накопление этого металла в картофеле и моркови с изучаемой территории.

В то же время показатели фонового содержания ртути в сельскохозяйственных растениях в европейских странах на порядок выше, чем приведённые для России, в частности, в для Южного Прибайкалья (см. табл. 10). Это свидетельствует о значительной вариативности фоновых содержаний ртути в овощной продукции, которая, по-видимому, зависит от уровня техногенной нагрузки в том или ином агроландшафте.

Таблица 9

Содержание ртути в овощных культурах, выращенных в черте Усо́лья-Сибирского и на условно-фоновом участке (сухая масса), мг/кг

Растение	Среднее	Минимальное	Максимальное
г. Усо́лье-Сибирское			
Картофель (клубни) $n = 7$	0,003 (0,091)	0,002 (0,028)	0,006 (0,27)
Морковь (корнеплоды) $n = 6$	0,005 (0,157)	0,003 (0,065)	0,007 (0,46)
Морковь (ботва) $n = 3$	0,023 (0,480)	0,012 (0,387)	0,030 (0,59)
условно-фоновый участок (на удалении 30 км от города)			
Картофель (клубни) $n = 9$	0,005 (0,170)	0,002 (0,026)	0,011 (0,34)
Морковь (корнеплоды) $n = 2$	0,005 (0,171)	0,004 (0,091)	0,006 (0,25)

Допустимые и фоновые содержания ртути в овощах (сухая масса), мг/кг

Допустимые остаточные количества в овощах [13]	0,020
Фоновые содержания в картофеле и овощах [13]	0,003
Фоновые содержания в моркови [9]	0,0057–0,086
Фоновые содержания в картофеле [9]	0,010–0,047
Фоновые содержания в картофеле, оз. Байкал ¹	0,002–0,005

Примечание: ¹Данные автора

Относительно небольшие содержания ртути в овощных культурах в черте г. Усолье-Сибирское по сравнению с дикорастущими растениями могут быть обусловлены как видовыми различиями растений, так и значительно более низкими валовыми содержаниями и небольшой биодоступностью этого металла в пахотных почвах (см. табл. 5).

Интересной особенностью является увеличение содержания ртути в ботве моркови относительно её корнеплодов (см. табл. 9). Это может указывать на влияние дополнительного атмосферного источника загрязнения наземных частей овощных культур, как и в случае рассмотренных ранее древесных растений.

Заключение

Таким образом, особенности миграции и степень биодоступности ртути в почвах Южного Прибайкалья определяются совокупностью таких факторов, как формы нахождения ртути в почвах, видовая принадлежность и биологические особенности растений, степень техногенного загрязнения.

Изучение форм нахождения ртути показало, что этот элемент находится в почвах преимущественно в виде органических и минеральных комплексов. При этом органические соединения, по-видимому, имеют решающее значение в процессах миграции и степени биодоступности, так как обладают наибольшим сродством к растениям и способностью накапливаться в них. Установленные прямые корреляции между содержанием ртути в органической фракции почв и в произрастающих на них травах подтверждают этот факт.

Кроме того, бионакопление ртути имеет видоспецифичный характер. Среди изученных живых организмов наибольшей способностью аккумулировать ртуть обладают грибы, чему способствуют их физиологические особенности. Травянистые растения концентрируют ртуть в значительно меньших количествах.

Сельскохозяйственные почвы близ г. Усолье-Сибирское слабо загрязнены ртутью. Содержание этого металла в биодоступных формах

здесь минимально по сравнению с другими изученными почвами, однако в культурных растениях прослеживается накопление ртути в количествах, повышенных относительно фоновых.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ №12-05-00257-а.

Литература

1. Байдина Н. Л. Ртуть в почвах Новосибирска // *Агрохимия*. – 1999. – № 10. – С. 89–92.
2. Биоаккумуляция ртути рыбами Братского водохранилища / М. В. Пастухов [и др.] // *Материалы III Всерос. конф. по водной токсикологии «Антропогенное влияние на водные организмы и экосистемы»*. – Борок : ИБВВ, 2008. – С. 66–70.
3. Геохимия окружающей среды Прибайкалья (Байкальский геоэкологический полигон) / В. И. Гребенщикова [и др.] // ред. М. И. Кузьмин. – Новосибирск : Академ. изд-во «Гео», 2008. – 234 с.
4. Гордеева О. Н. Формы нахождения и особенности миграции химических элементов в почвах г. Свирска в условиях техногенного загрязнения (Южное Прибайкалье) / О. Н. Гордеева, Г. А. Белоголова // *Инженер. экология*. – 2011. – № 4. – С. 11–29.
5. Государственный доклад о состоянии окружающей природной среды в Иркутской области в 2000 году. – Иркутск, 2001. – 383 с.
6. Елпатьевский П. В. Геохимия миграционных потоков в природных и природно-техногенных геосистемах / П. В. Елпатьевский. – М. : Наука, 1993. – 253 с.
7. Жлоба Н. М. Аккумуляция тяжелых металлов в плодовых телах высших грибов / Н. М. Жлоба, Т. И. Пантелеймонова // *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*. – Л. : Гидрометеиздат, 1988. – Т. 11. – С. 90–96.
8. Иванов В. В. Экологическая геохимия элементов / В. В. Иванов. – М. : Экология, 1997. – Ч. 5. – 576 с.
9. Кабата-Пендиас А. Микроэлементы в почвах и растениях / А. Кабата-Пендиас, Х. Пендиас. – М. : Мир, 1989. – 440 с.
10. Ковальский В. В. Геохимическая экология / В. В. Ковальский. – М. : Наука, 1974. – 298 с.
11. Контроль химических и биологических параметров окружающей среды / под ред. Л. К. Исаева. – СПб. : Экол.-аналит. информ. центр «Союз», 1998. – 896 с.

12. Кузнецов П. В. Картирование химического загрязнения почв г. Черемхово и его окрестностей / П. В. Кузнецов, В. И. Гребенщикова // *Материалы конф. «Природа и общество: взгляд из прошлого в будущее»*. – Иркутск : ИГ СО РАН, 2011. – С. 143–145.
13. Кузубова Л. И. Метилртуть в окружающей среде (распространение, образование в природе, методы определения) / Л. И. Кузубова, О. В. Шуваева, Г. Н. Аношин. – Новосибирск : ГПНТБ СО РАН, 2000. – 82 с.
14. Опасность ртутного загрязнения и принципы здорового безопасного питания на территориях с повышенной ртутной нагрузкой (Приангарье) / Н. В. Ефимова [и др.]. – Иркутск-Ангарск : РИО ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2004. – 48 с.
15. Орлов Д. С. Химия почв / Д. С. Орлов, Л. К. Садовникова, Н. И. Суханова. – М. : Высш. шк., 2005. – 558 с.
16. Перельман А. И. Геохимия элементов в зоне гипергенеза / А. И. Перельман. – М. : Недра, 1972. – 288 с.
17. Редкометалльный потенциал углей Минусинского бассейна / С. И. Арбузов [и др.]. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, фил. «Гео», 2003. – 347 с.
18. Ртутное загрязнение Братского водохранилища (Путеводитель геоэкологической экскурсии) / П. В. Коваль [и др.]. – Иркутск : Ин-т геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН, 2000. – 40 с.
19. Ртуть в рыбе Братского водохранилища / П. В. Коваль [и др.] // *Материалы конф. «Теоретические и практические проблемы безопасности Сибири и Дальнего Востока»*. – Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 1999. – Вып. 1, ч. 1. – С. 105–109.
20. Ртуть в экосистеме Братского водохранилища и экологические последствия ртутного загрязнения / П. В. Коваль [и др.] // *Бюл. МОИП. Отд. биол.* – 2008. – Т. 113, вып. 4. – С. 80–87.
21. Федотов П. С. Статистические и динамические методы фракционирования форм элементов в почвах, илах и донных отложениях / П. С. Федотов, Б. Я. Спиваков // *Успехи химии*. – 2008. – № 77 (7). – С. 690–703.
22. Фитотоксичность фосфорорганических соединений и ртути / С. Г. Скугорева [и др.]; ред. Т. К. Головки. – Екатеринбург : УрО РАН, 2008. – 155 с.
23. Халбаев В. Л. Распределение ртути в почвах и почвогрунтах г. Иркутска и его окружения / В. Л. Халбаев, В. И. Гребенщикова // *Материалы конф. «Геология Западного Забайкалья»*. – Улан-Удэ : БГУ, 2011. – С. 115–117.
24. Щеглов А. И. Грибы – биоиндикаторы техногенного загрязнения / А. И. Щеглов, О. Б. Цветнова // *Природа*. – 2002. – № 11. – С. 39–46.
25. Экогеохимия городов Восточной Сибири / под ред. В. Н. Макарова [и др.]. – Якутск : Ин-т мерзлотоведения СО РАН, 1993. – 108 с.
26. Юдович Я. Э. Проблема ртути в углях / Я. Э. Юдович, М. П. Кетрис // *Вестн. Ин-та геологии Коми НЦ УрО РАН*. – 2004. – № 10. – С. 6–12.
27. Browne C. L. Uptake of mercury vapour by wheat. An assimilation model / C. L. Browne, S. C. Fang // *Plant Physiol.* – 1978. – N 61. – P. 430.
28. Evaluation of Sequential Extraction Procedure for the Determination of Extractable Metal Contents in Sediments, Fresenius / P. Quevauviller [et al.] // *J. of Analytic. Chemistry*. – 1994. – Vol. 349, N 12. – P. 808–814.
29. Klock A. Orientierungsdaten for tolerierbare Gesamtgehalte einiger Elemente in Kulturbuden / A. Klock // *Mitteilungen VDLUFA*. – 1980. – H. 1–3. – S. 9–11.
30. Metal content of fungal sporocarps from urban, rural and sludge-treated site / D. Zabowski [et al.] // *J. Environ. Qual.* – 1990. – Vol. 19. – P. 372–377.
31. Selective extractions to biogeochemically relevant fractionation of inorganic mercury in sediment and soils / N. S. Bloom [et al.] // *Anal. Chim. Acta*. – 2003. – Vol. 479, N 2. – P. 233–248.
32. Speciation of heavy metals in soils and sediments. An account of the improvement and harmonization of extraction techniques undertaken under the auspices of the BSR (Community Bureau of Reference) of the commission of European communities / A. Ure [et al.] // *Int. J. Environ. Anal. Chem.* – 1993. – Vol. 51. – P. 135–151.
33. Tessier A. Sequential extraction procedures for the speciation of particulate trace metals / A. Tessier, P. G. C. Campbell, M. Bisson // *Anal. Chem.* – 1979. – N 51. – P. 844–851.

Biogeochemistry features of mercury migration within soil-plant system in the Southern Baikal region

O. N. Gordeeva, G. A. Belogolova, L. D. Andrulaitis

A. P. Vinogradov Institute of Geochemistry of SB RAS, Irkutsk

Abstract. The authors examined the pattern of mercury distribution in soils and plants of Usolye-Sibirskoe town and the surrounding area. The mercury contents were measured in the town and surrounding forest soils. On the background of increased mercury it was found that in forest soils this metal was accumulated by plants and high fungi in larger amounts. The fact may be caused by a significant mercury contents in organic forms, which were obtained by the stage-wise extraction. Among other studied forms, the organic forms of mercury largely contribute to the mercury migration cycles. Even if, the contents of mercury in soils and plants are sufficiently high, the mercury total contents do not exceed sanitary and hygienic norms.

Key words: Mercury, forms of occurrence, bioavailability, plants, high fungi, chemical plant "Usolyekhimprom", Southern Baikal region

*Гордеева Ольга Николаевна
Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1 а
младший научный сотрудник
тел.: (3952) 42-39-07, факс: (3952) 42-70-50
E-mail: gordeeva@igc.irk.ru*

*Gordeeva Ol'ga Nikolaevna
Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS
1a, Favorsky St., Irkutsk, 664033
junior research scientist
phone: (3952) 42-39-07, fax: (3952) 42-70-50
E-mail: gordeeva@igc.irk.ru*

*Белоголова Галина Александровна
Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1 а
кандидат геолого-минералогических наук
ведущий научный сотрудник
тел.: (3952) 42-39-07, факс: (3952) 42-70-50
E-mail: gabel@igc.irk.ru*

*Belogolova Galina Aleksandrovna
Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS
1a, Favorsky St., Irkutsk, 664033
Ph.D. in Geology and Mineralogy
leading research scientist
phone: (3952) 42-39-07, fax: (3952) 42-70-50
E-mail: gabel@igc.irk.ru*

*Андрулайтис Людмила Даниловна
Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1 а
ведущий специалист
тел.: (3952) 42-56-58, факс: (3952) 42-70-50
E-mail: amila@igc.irk.ru*

*Andrulaitis Lyudmila Danilovna
Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS
1a Favorsky St., Irkutsk, 664033
leading specialist
phone: (3952) 51-14-42, fax: (3952) 42-70-50
E-mail: amila@igc.irk.ru*