

УДК 550.47

Содержание ртути в хвое Юго-Западного Прибайкалья

Е.Е. Ляпина¹, Е.В. Шворнева², Н.Н. Воропай^{1,3*}

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

³Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1

Поступила в редакцию 21.01.2017 г.

Исследовано содержание ртути в разновозрастной хвое различных пород деревьев на территории участков «Монды», «Аршан» и «Тунка» в Республике Бурятия. Приводятся оригинальные данные по уровню накопления ртути, а также особенностям ее распределения в зависимости от вида хвойных, возраста хвои, ландшафтных и климатических условий. Результаты, полученные для Восточной Сибири, не превышают данных, приведенных в литературе, и лежат в пределах средних значений для Сибири и России в целом.

Ключевые слова: ртуть, аэрозоли, хвоя, биоиндикация, Прибайкалье, экология, геоэкология; mercury, aerosols, needles, bioindication, Baikal region, ecology, geoeology.

Введение

Ртуть — элемент первого класса опасности, обладает повышенной токсичностью, миграционной способностью, спецификой форм трансформации в компонентах окружающей среды [1]. Она относится к группе тиоловых ядов, мутагенна, метилирует с образованием высокотоксичных соединений, признана одним из самых опасных загрязнителей природной среды [2]. Независимо от источников поступления ртути в окружающую среду (антропогенных или природных) наибольший вклад в миграцию поллютанта вносит атмосфера.

Удобным и информативным биоиндикатором экологического состояния атмосферного воздуха является хвоя. Кроме того, хвоя участвует в формировании почвенного покрова, а накопленные в ней химические элементы формируют составы почвы, поверхностных и подземных вод [3]. Во время лесных пожаров в атмосферу выделяется свыше 40% ртути, иммобилизованной лесными массивами. Растения способны не только накапливать ртуть в весьма высоких концентрациях, но и выделять ее обратно в атмосферу в процессе дыхания [4].

Цель настоящей работы — анализ содержания ртути в разновозрастной хвое на территории Юго-Западного Прибайкалья (Республика Бурятия), выявление особенностей накопления ртути в хвое в зависимости от вида дерева, возраста хвои, климатических и ландшафтных характеристик.

Объекты и методы исследования

Исследования проводились на территории Юго-Западного Прибайкалья (Республика Бурятия, национальный парк «Тункинский») на трех участках: «Монды», «Тунка» и «Аршан». Участок «Монды» расположен в западной части района; он представляет собой высокогорную местность на границе с Монголией. Участок «Тунка» находится в центре Тункинской долины на левом берегу р. Иркут. Участок «Аршан» располагается на северной окраине Тункинской котловины у подножия Тункинских Гольцов. Хвою отбирали летом 2015 г. методом смешанной пробы с деревьев примерно одного возраста в нижней части кроны на высоте 1,5–2,0 м от поверхности земли согласно стандартным методическим указаниям [5] и помещали в zip-пакеты — всего отобрано 59 проб хвои сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), кедр сибирского (*Pinus sibirica* L.), лиственницы сибирской (*Larix sibirica* L.) и можжевельника обыкновенного (*Juniperus communis* L.). Пробы доводили до воздушно-сухого состояния при комнатной температуре и измельчали. Хвою не промывали. В ходе работы оценивали содержание ртути, накопленной в хвое за последние 5 лет (в период с 2011 по 2015 г.).

Содержание Hg в пробах определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии с помощью ртутного анализатора РА-915+ с пиролизической приставкой ПИРО-915 (метод пиролиза). Точность определения — 5 нг/г. Концентрацию ртути рассчитывали на 1 г сухого вещества. Методика обработки результатов включала расчет эколого-геохимических показателей: коэффициента концентрации и временно-допустимой концентрации (ВДК).

* Елена Евгеньевна Ляпина (eeldv@mail.ru); Елена Валерьевна Шворнева (shvornevalena@mail.ru); Надежда Николаевна Воропай (voropay_nn@mail.ru).

Для расчета взаимосвязи концентрации ртути с метеорологическими характеристиками использовали данные по температуре и влажности воздуха в точках пробоотбора, измеряемые датчиками температуры и влажности ТЕРМОХРОН-DS1922L-F5 (термограф) (диапазон регистрируемых температур — от -40 до $+85$ °С, погрешность регистрации температуры — $\pm 0,5 \dots 0,9$ °С) и ГИГРОХРОН-DS1923-F5 (термогигрограф) (диапазон регистрируемых температур — от -20 до $+85$ °С, относительной влажности — $0 \dots 100\%$ RH ($\Delta_{RH} = \pm 5\%$ RH)) с периодичностью 3 ч (синхронно со стандартными сроками на метеорологических станциях).

Результаты и обсуждения

Средние концентрации Hg в хвое на территории всех исследованных участков вне зависимости от породы дерева и возраста значительно не отличаются друг от друга и меняются в интервале 10–12 нг/г. Повышенное среднее содержание ртути отмечается в хвое на территории участка «Аршан», наименьшее — на территории участка «Тунка». Более детальный анализ показал, что ртуть лучше аккумулируется в хвое можжевельника и кедра (16 нг/г); медленнее процесс аккумуляции протекает в хвое лиственницы — 8 нг/г (рис. 1).

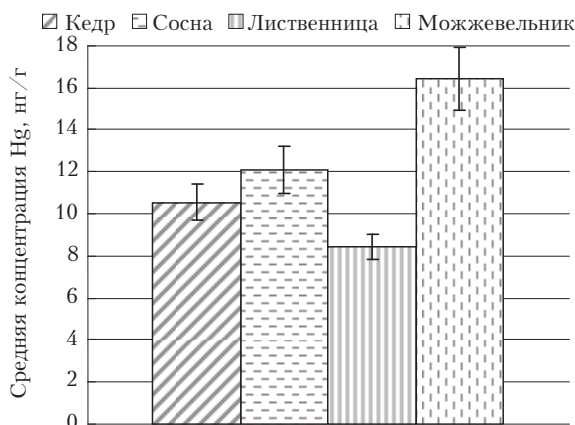


Рис. 1. Среднее содержание Hg в хвое кедра, сосны, лиственницы и можжевельника (Республика Бурятия)

Максимальный временной интервал, позволяющий оценить накопление ртути в исследованных образцах, составляет 5 лет. В данных других исследователей [3] отмечается, что чем старше хвоя, тем больше ртути в ней содержится. В наших результатах такая тенденция также прослеживается, но отмечается особенность, которая состоит в установлении максимальных концентраций с 3-, 4-летнего возраста хвои (рис. 2). В дальнейшем значимых отличий в поступлении ртути в хвою не наблюдается. Пятилетняя хвоя присутствует в пробах сосны и кедра с участков «Аршан» и «Тунка». В хвое сосны, представленной в большинстве проб и характеризующейся наибольшим возрастным интервалом, среднее содержание ртути меняется от 12 до 15 нг/г. Максимальная концентрация устанавливается с 4-го года ее произрастания и составляет в среднем

20 нг/г (19–21 нг/г). В хвое кедра наибольшие концентрации устанавливаются также с четвертого года произрастания и в среднем составляют 26 нг/г (25–27 нг/г).

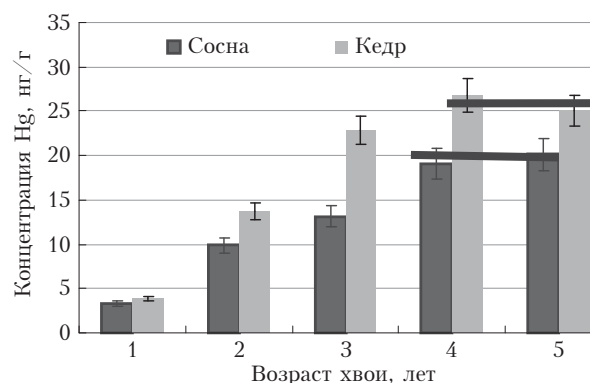


Рис. 2. Среднее содержание Hg в хвое сосны и кедра в зависимости от возраста хвои

Исследования ежегодного поступления Hg в хвою вне зависимости от вида дерева показали неоднородность накопления.

Среди однолетней хвои всех деревьев максимальная (6 нг/г) и минимальная (2 нг/г) концентрации ртути наблюдаются в хвое сосны (данные получены для участка «Аршан»). Средняя концентрация ртути в хвое первого года произрастания ртути равна 4 нг/г.

В 2-летней хвое больше всего ртути (16 нг/г) содержится в хвое кедра, а меньше всего (6 нг/г) в хвое сосны. Данные также получены для участка «Аршан». Средняя концентрация ртути в 2-летней хвое составляет 12 нг/г.

В исследованной 3-летней хвое наибольшее количество Hg (25 нг/г) отмечено в хвое кедра (участок «Аршан»), а наименьшее (10 нг/г) — в хвое сосны (участок «Тунка»). Среднее содержание Hg в 3-летней хвое — 13 нг/г.

Для 4-летней хвои максимум содержания ртути (27 нг/г) приходится на хвою кедра, а минимум (17 нг/г) — на хвою сосны (участок «Аршан»). В пробах 4-летней хвои средние значения Hg составляют 16 нг/г.

В ходе анализа 5-летней хвои самые высокие концентрации Hg определили в хвое кедра — 25 нг/г, а самые низкие в хвое сосны — 18 нг/г. Средние концентрации ртути в 5-летней хвое не отличаются от 4-летней.

Следует отметить, что в среднем во всех исследованных образцах хвои больше всего ртути содержится в хвое 4-летнего возраста, а меньше всего — в однолетней.

При анализе проб хвои сосны, выросшей в разных условиях, отличий в распределении ртути в хвое разного возраста не выявлено.

Среди рассматриваемых пород деревьев наибольшим разнообразием условий произрастания отличаются кедр и лиственница. Для них проанализирована связь накопления ртути с местом роста на примере участка «Монды», где расположены 5 пунктов отбора проб (рис. 3, а). Между 1-й и 5-й

точками перепад высот составляет приблизительно 600 м (рис. 3, б), вершина участка (5-я точка) находится на высоте 2322 м над уровнем моря.

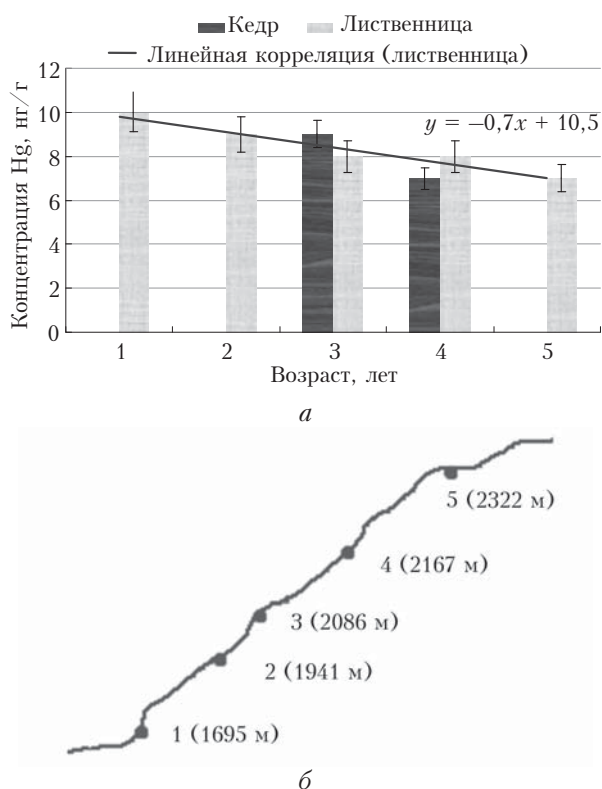


Рис. 3. Содержание Hg в хвое лиственницы и кедра в зависимости от места произрастания (а); рельеф участка «Монды»: 1 – подножие горы; 2–4 – промежуточные точки; 5 – вершина участка, над уровнем моря (б)

Концентрации Hg в хвое лиственницы имеют выраженную зависимость: максимальная концентрация наблюдается в самой низкой точке участка (10 нг/г), с высотой она уменьшается и достигает минимума на вершине (7 нг/г) (рис. 3). Возможно, такое распределение связано с выносом химических элементов с вершины горы вместе с осадочным материалом во время дождей и в период снеготаяния и накоплением у подножия, а также с циркуляционными условиями и температурным режимом.

Для выявления взаимосвязи поступления ртути в хвою с климатическими характеристиками района были рассчитаны коэффициенты корреляции между концентрацией ртути в хвое и температурой воздуха и количеством осадков как за вегетационный период, так и в течение всего года (табл. 1); в последнем случае расчеты проводили только для 5-летней хвои. Это связано с тем, что такой ряд данных длиннее, поэтому достоверность полученных результатов выше. Для вычислений взяты средние данные содержания ртути для каждого вида деревьев по всему району исследования.

Результаты расчетов показывают неоднородность связи между концентрацией ртути и температурой воздуха, а также концентрацией ртути и количеством осадков. Так, для сосны выявлена обратная

зависимость от температуры как за вегетационный период, так и в течение всего года для большинства точек исследования. С высотой эта связь усиливается. Связь с осадками прямая и достаточно тесная, но не для всех точек исследования; с высотой она ослабевает. Хвоя кедра представлена меньшим количеством точек пробоотбора. Однако для нее также обнаружена обратная связь концентрации ртути в хвое с температурой и прямая – с осадками как в течение всего года, так и за вегетационный период.

Таблица 1

Корреляция между средним содержанием Hg в хвое и климатическими параметрами

Хвоя	Вегетационный период (май–сентябрь)		Год					
	Т, °С		Осадки, мм		Т, °С		Осадки, мм	
	r	P	r	P	r	P	r	P
Сосны	-0,99	0,12	0,96	0,63	-0,90	0,75	0,56	0,75
Кедр	-0,83	0,15	-0,83	0,25	-0,95	0,23	-0,32	0,38

Примечание. r – коэффициент корреляции; P – уровень значимости.

Положительные корреляции вполне понятны и объяснимы: при повышенных температурах воздуха активнее идет эманация ртутных паров с подстилающей поверхности, а также химические и биохимические реакции в воздухе, почве и воде. Так как очищение атмосферы происходит в основном с осадками, то при увеличении количества осадков повышается и вероятность их накопления растительностью. В то же время часть ртути смывается осадками с поверхности хвои, тем самым препятствуя ее проникновению в растение. Большая часть обнаруживаемой в хвое ртути имеет как раз атмосферное происхождение.

Все полученные значения концентрации ртути в пробах хвой вне зависимости от возраста, породы дерева и места произрастания являются фоновыми. Поэтому для расчета геоэкологических характеристик использовались данные для фоновых территорий, приведенные в литературных источниках (табл. 2).

Таблица 2

Характерные уровни содержания Hg в растениях различных регионов мира

Объект	Среднее, нг/г	Литературный источник
Фон в наземных растениях	30–700	
Среднее в наземных растениях	15	[1]
Европа, растения	8	[6]
Норвегия, растения	47–116	[7]
Листья и хвоя деревьев	8–26	[2]
Канада, хвоя	4–48	[8]
Польша, хвоя	100–500	[4]
Испания, хвоя	6–32	[6]
Россия, хвоя	132	[3]
Западное Забайкалье, хвоя	6–12	[9]
Республика Бурятия, хвоя	9–13,4	[10]
Горный и рудный Алтай, хвоя	300	[11]
Байкальский регион, хвоя	5,8–13	[12]
Томская область, хвоя	79–165	[13]

Кратность содержания ртути в исследованных пробах по сравнению с минимальным фоновым значением [7] не превышает 4, в среднем составляя 2,5 (табл. 3). Максимальное превышение над расчетной ВДК составляет 2.

Таблица 3

Геоэкологические особенности ртутной нагрузки на территорию Республики Бурятия

Вид хвой	Концентрация ртути, нг/г		Кс	ВДК
	min-max	среднее		
«Монды»				
Кедр	4–15	8 ± 0,4	2	1
Лиственница	7–10	8 ± 0,6	2	1
Можжевельник	15–17	16 ± 1,4	4	2
«Аршан»				
Сосна	2–21	10 ± 1,1	2,5	1,25
Кедр	3–27	16 ± 1,4	3	1,5
Лиственница	8–10	9 ± 0,4	2	1
«Тунка»				
Сосна	4–22	12 ± 1,1	3	1,5
Лиственница	7–9	8 ± 0,4	2	1

Примечание. Кс = С/Сф – коэффициент концентрации; ВДК = С/2Сф (С – содержание ртути в пробе, Сф – содержание ртути на фоновом участке (4 нг/г [7])).

Сравнивая полученные в ходе исследования 2015 г. концентрации ртути на территории Республики Бурятия с данными, приведенными в литературных источниках (табл. 2), следует отметить сопоставимость результатов исследования как для территории Республики Бурятия, так и для Сибири и России в целом. Однако более детальный анализ показывает, что наши данные значительно ниже, чем для Горного Алтая, Польши, Томской области, а также для России в целом.

Заключение

В результате исследований содержания и геоэкологических особенностей накопления ртути в хвое на территории Республики Бурятия выявлено, что концентрации Hg соответствуют данным, полученным другими исследователями как для территории Байкальского региона, так и для Сибири и России в целом. Наиболее высокие концентрации ртути отмечаются в хвое можжевельника и кедра, наименьшие – в хвое сосны. По мере старения хвой концентрация ртути увеличивается, достигает максимума в возрасте 3–4 лет и далее значимо не меняется. Кроме того, поступление Hg в хвою уменьшается с увеличением высоты относительно уровня моря. Расчеты взаимосвязей содержания ртути в хвое с температурой воздуха и количеством осадков показывают неоднородность связей. Данные

геоэкологических расчетов свидетельствуют о низком уровне накопления Hg хвойными на территории Республики Бурятия.

1. Янин Е.П. Ртуть в окружающей среде промышленного города. М.: ИМГРЭ, 1992. 169 с.
2. Ермаков В.В. Биогенная миграция и детоксикация ртути // Материалы Междунар. симп. «Ртуть в биосфере: эколого-геохимические аспекты», Москва, 2010 г. М.: ГЕОХИ РАН, 2010. С. 5–14.
3. Аношин Г.Н., Маликова И.Н., Ковалев С.И., Андреева Н.В., Сухоруков Ф.В., Цибульчик В.М., Щербов Б.Л. Ртуть в окружающей среде юга Западной Сибири // Химия в интересах устойчивого развития. 1995. Т. 3, № 1–2. С. 69–111.
4. Черненко Т.В. Реакция лесной растительности на промышленное загрязнение. М: Наука, 2002. 191 с.
5. Алексеев В.А. Экологическая геохимия. М.: Логос, 2000. 627 с.
6. Aboal J.R., Fernandez J.A., Carballeira A. Sampling optimization, at site scale, in contamination monitoring with moss, pine and oak // Environ. Pollut. 2001. V. 115. P. 313–316.
7. Steinnes E., Sjöbakk T.E. Order-of-magnitude increase of Hg in Norwegian peat profiles since the outset of industrial activity in Europe // Environ. Pollut. 2005. V. 137. P. 365–370.
8. Лапердина Т.Г., Туяков А.В., Егоров А.И., Мельникова М.В., АскарOVA О.Б., Банщиков В.А., Хвостова Т.Е., Цыбикдаржиев Ж., Бочко О.К. Ртутное загрязнение окружающей среды в зонах влияния золотодобывающих предприятий Забайкалья // Химия в интересах устойчивого развития. 1995. Т. 3, № 1–2. С. 57–67.
9. Афанасьева Л.В., Кашин В.К., Плешанов А.С. Михайлова Т.В., Бережная Н.С. Элементный состав хвой и морфометрические параметры сосны обыкновенной в условиях атмосферного промышленного загрязнения в Западном Забайкалье // Хвойные бореальные зоны. 2004. Вып. 2. С. 112–119.
10. Афанасьева Л.В., Михайлова Т.А., Кашин В.К. Состояние основных древостоев в условиях техногенного загрязнения в Республике Бурятия // Растительные ресурсы. 2010. Т. 46, вып. 2. С. 51–60.
11. Гусев А.И., Гусева О.И. Биогеохимические индикаторы накопления тяжелых металлов растениями на горнорудных предприятиях Горного и рудного Алтая // Вестн. ВГУ. Геоэкол. 2012. № 1. С. 194–199.
12. Михайлова Т.А., Калугина О.В., Афанасьева Л.В., Нестеренко О.И. Тренды содержания химических элементов в хвое сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в разных условиях произрастания и при техногенной нагрузке // Сиб. экол. ж. 2010. № 2. С. 239–247.
13. Ляпина Е.Е. Геоэкологические особенности ртутной нагрузки на территорию Томской области по данным биомониторинговых исследований [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. URL: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=19876>. (дата обращения: 6.11.2016).

E.E. Lyapina, E.V. Shvorneva, N.N. Voropai. Mercury content in needles in the south-western Baikal region.

The content of mercury in uneven-age needles of different trees from sites “Mondy”, “Arshan”, and “Tunka”, Republic of Buryatia, is studied. Original data on mercury accumulation level and features of its distribution depending on conifer type, age of needles, landscape, and climatic conditions are presented. The Hg concentrations in needles estimated for the territory of Eastern Siberia do not exceed the literature data and are within the limits of average concentrations for Siberia and Russia in general.