

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РТУТНОЙ НАГРУЗКИ НА ТЕРРИТОРИЮ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ ПО ДАННЫМ БИОМОННИТОРИНГОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Ляпина Е.Е.^{1,2}

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск, Россия (634055, Россия, г. Томск, пр. Академический, 10/3), e-mail: eeldv@mail.ru

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия (634050, Россия, г. Томск, ул. Ленина, 30)

Настоящая статья посвящена исследованию содержания ртути в природных объектах г. Томска и Томской области. Приводятся оригинальные данные по уровню накопления ртути биологическими объектами, собранными как на территориях, испытывающих антропогенное воздействие (г. Томск), так и на условно фоновых участках (Томская область). Выявлены геоэкологические особенности ртутной нагрузки и регионального переноса поллютанта на исследованных территориях. В качестве биологических индикаторов ртутной нагрузки на исследованные территории наиболее удобными и достоверными выявлены эпифитные виды лишайников и сфагновые мхи. Определены особенности накопления и перераспределения ртути в зависимости от видовой принадлежности, места произрастания и возраста биологических объектов, а также от климатических условий. Дана оценка возможности использования даров природы в продовольственных целях.

Ключевые слова: ртуть, биологические объекты, мхи, лишайники, грибы, хвоя, годовые кольца деревьев, концентрация.

GEOECOLOGICAL FEATURES OF MERCURY LOAD OF THE TERRITORY OF THE TOMSK REGION ACCORDING TO BIOMONITORINGOVY RESEARCHE

Lyapina E.E.

¹Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IMCES SB RAS) (634055, Tomsk, 10/3, Academichesky ave., Russia) e-mail: eeldv@mail.ru

²National Research Tomsk Polytechnic University (634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30, Russia)

The present article is devoted to research of the content of mercury in natural objects of Tomsk and the Tomsk region. Original data on mercury accumulation level are provided by the biological objects collected as in the territories experiencing anthropogenous influence (Tomsk) and on conditionally background sites (Tomsk region). Geoecological features of mercury loading and regional transfer of a pollyutant in the studied territories are revealed. As biological indicators of mercury load of the studied territories the most convenient and reliable revealed types of lichens and mosses. Features of accumulation and redistribution of mercury depending on specific accessory, a place of growth and age of biological objects, and also from climatic conditions are defined. The assessment of possibility of use of gifts of the nature in the food purposes is given.

Keywords: mercury, biological objects, mosses, Lichens, mushrooms, needles, annual rings of trees, concentration

Ртуть – уникальный химический элемент, относящийся к первому классу опасности. Она вездесуща, технофильна, биофильна, многолика и присутствует во всех средах и типах окружающей среды, имеет много форм нахождения, что существенно затрудняет ее изучение. Она супертоксична и суперпатологична даже в очень низких концентрациях. Обладает высокой деструктивной биологической активностью, способна давать скрытые антропогенные скопления [5, 10]. При всех путях поступления ртути в компоненты окружающей среды, особую важность приобретают природные компоненты, ее концентрирующие, и которые могут использоваться как индикаторы ее атмосферной эмиссии: грибы, лишайники, мхи, хвоя, а также годовые кольца деревьев [1, 2 ,6 ,7 , 8, 9].

Цель настоящей работы – определение содержания ртути в биологических объектах (грибах, лишайниках, мхах, хвое, а также древесине годовых колец деревьев), характеристика и сравнение их аккумулирующих свойств при использовании в качестве биоиндикаторов ртутной нагрузки на территорию Томской области.

Объекты и методы исследования

В качестве объектов биологической аккумуляции ртути рассмотрели:

- сфагновые мхи (*Sphagnum* sp.);
- лишайники (*Cladonia stellaris* (Opiz) Pazdor and Vezda, *Cladonia arbuscula* (Wallr) Flot. ssp. *Mitis*, *Cladonia deformis* (L.) Hoffm, *Cladonia cornuta* (L.) Hoffm, *Cladonia stygia* (Fr.) Ruoss, *Evernia mesomorpha* (Nyl.), *Usnea subfloridana* Stirt);
- грибы: груздь настоящий (*Lactarius resimus* (Fr.)), груздь черный (*Lactarius necator* (Bull.: Fr.)), подберезовик (*Leccinum scabrum*), моховик зеленый (*Xerocomus subtomentosus*), моховик желто-бурый (*Suillus variegatus*), трутовик лакированный (*Ganoderma lucidum*), белый гриб (*Boletus edulis*), опенок (*Agaricales*), рыжик (*Lactarius*), масленок (*Suillus*), сморчок (*Morchella*);
- разновозрастная хвоя: кедра сибирского (*Pinus sibirica*), сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), пихты сибирской (*Abies sibirica* Ledeb.), ели сибирской (*Picea obovata*), можжевельника обыкновенного (*Juniperus communis* L.);
- древесина годовых колец: тополя черного (*Populus nigra* L.), сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.),

как на территориях испытывающих антропогенную нагрузку (г. Томск), так и на фоновых участках (Томская область).

Определение содержания ртути выполнено методом атомно-абсорбционной спектроскопии (метод пиролиза) на ртутных газоанализаторах РГА-11 (предел обнаружения 1 нг/г, погрешность определения 30 %) в Институте мониторинга климатических и экологических систем (ИМКЭС) и РА-915⁺ (предел обнаружения 5 нг/г, погрешность определения 30 %) в учебно-научной лаборатории Международного инновационного научно-образовательного центра «Урановая геология» кафедры геоэкологии и геохимии Национального исследовательского Томского политехнического университета. Исследования проводились в период с 2003 по 2013 г. Концентрации ртути рассчитаны на 1 г сухого вещества пробы. Вся подготовка проб для анализа проводилась в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-84 (Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа).

Результаты и обсуждения

Грибы. Грибы играют важную роль в минерализации органического вещества и образования гумуса в экосистемах [1, 9] и способны накапливать ртуть до высоких концентраций. К сожалению, особенности распределения ртути в разных грибах и разных ландшафтных зонах изучены не достаточно.

Полученные в ходе анализа данные по содержанию ртути в разных грибах, собранных в различных экологических условиях, превышают допустимое содержание ртути для грибов до 88 раз (50 нг/г по СанПиН 2.3.2.1078-01 "Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов").

Содержание ртути в исследованных грибах варьирует в широких пределах от 16 нг/г в грузде настоящем, отобранном на фоновом участке в Томской области, до 4400 нг/г в белом грибе, выросшем в Томском районе. Следует отметить, что максимальные содержания ртути обнаружены в губчатых грибах, что подтверждается и литературными данными [1]. Концентрации Hg в грибах, собранных в черте города Томска, в среднем не превышают значения для этих же грибов в других точках опробования. В результате исследования содержания ртути отдельно в шляпках и ножках грибов, выявлено, что шляпки накапливают ртуть от 1,6 до 3,8 раз больше, по сравнению с ножками. Такой характер накопления поллютанта в частях грибов отмечается и другими исследователями [1, 9]. Следует отметить связь между концентрацией ртути в грибах и местом их произрастания. Как для фоновых участков ($r=0,88$), так и для г. Томска ($r=0,63$).

Высокие концентрации ртути выявлены в дождевиках, которые отличаются высокой скоростью роста, особенно в период дождей, поглощая огромное количество влаги, выпадающей из атмосферы. А ртуть, как известно, выпадает на подстилающую поверхность из атмосферы сухим и мокрым осаждением. Также максимальные содержания ртути выявлены и в белом грибе, подобное содержание отмечается в работах [1, 10].

Использование грибов в биомониторинге затруднительно из-за короткого периода их жизни и нерегулярной продукции. Кроме того, исследования осложняются редкостью сбора грибов одного и того же вида на одной и той же территории. Это делает невозможным планомерный сбор образцов, а значит, искажает достоверность и закономерность получаемых результатов. Но, несомненно, стоит следить за содержанием опасных веществ, в том числе и ртути в съедобных грибах, с точки зрения определения риска при употреблении их в пищу.

Лишайники. Лишайники – одни из наиболее чувствительных к загрязнению организмов, и поэтому они могут быть использованы в качестве индикаторов компонентов загрязнения окружающей среды ртутью, а составление картосхем концентраций поллютанта поможет отразить границы воздушного загрязнения [8]. Способность к биоаккумуляции у

лишайников гораздо выше, чем у многих сосудистых растений, в виду особенностей их морфологии и физиологии. Кроме того, они способны накапливать загрязнения в течение всего года и даже при пониженных температурах воздуха. Также стоит отметить, что в отличие от сосудистых растений, лишайники не сбрасывают пораженные токсичными веществами части [9].

Значение средних концентраций в эпигейных лишайниках Томской области не изменяется в зависимости от места отбора пробы, существенное отличие (в 3,5 раза) отмечается в накоплении ртути эпифитными видами лишайников. Это объясняется высокой чувствительностью эпифитных видов лишайников к составу атмосферных выпадений. Накопление ртути лишайниками зависит от атмосферно-геохимических условий. Поглощение ртути – процесс пассивный, основанный на физико-химических свойствах мембран и не затрагивающий метаболические процессы [9]. Кроме того, более низкие концентрации в почвенных лишайниках по сравнению с эпифитными можно объяснить тем, что их поверхность контактирует с воздушной средой только в период, когда они не покрыты снегом. Зимой эпигейные виды лишайников защищены от влияния атмосферных загрязнений снежным покровом, тогда как эпифитные продолжают активно накапливать компоненты атмосферного загрязнения [8, 9].

Мхи. Мхи имеют ряд общих черт с лишайниками – сравнительно небольшие размеры, многолетний цикл развития, близкие физиологические и экологические свойства. Этим объясняется частое параллельное использование мхов и лишайников в биоиндикационных исследованиях. Величина содержания загрязняющих веществ во мхах зависит от ряда факторов: степени и состава загрязнения окружающей среды, сорбционной емкости различных видов, времени экспонирования, скорости роста растений [9].

Исследованные мхи отбирались как на участках фоновых болотных массивов, так и на участках осушенных болот. Средние содержания ртути во мхах Томской области варьируют от 27 до 78 нг/г, что соответствует средним значениям для мхов Алтайского края (от 50 до 90 нг/г) [1, 10]. Неоднородность в содержании Hg в общем не зависит от места отбора пробы, а также от концентрации поллютанта в субстрате. Хотя некоторая связь между количеством ртути во мхах и содержанием ее в торфе наблюдается ($r=0,65$).

Несмотря на свои небольшие размеры, мхи часто являются доминирующими организмами в сообществе. Особенно велик их вклад в продукцию и участие в циклах минерального обмена в экосистемах северных широт. Основным источником поступления растворенных веществ, в том числе и загрязнителей, как и для лишайников, являются атмосферные осадки, туманы, росы. Высокое соотношение поверхности мхов к их весу, а также недостаточно развитый поверхностный защитный слой при высокой способности

тканей поглощать катионы, делают их практически неспособными к защите от проникновения токсических примесей из атмосферного воздуха. Эффект аккумуляции ртути мхами достигается за счет большой сорбционной поверхности на единицу массы [9].

Коэффициент биоаккумуляции (далее K_6) является хорошим показателем интенсивности вовлечения ртути из почв в состав живого вещества. Однако этот показатель не зависит от величины элемента в почве, а лишь характеризует интенсивность вовлечения Hg в биологический круговорот. Другими словами, показывает величину биодоступных соединений ртути в субстрате. При значении $K_6 < 1$ происходит захват элемента растениями, при $K_6 > 1$ – накопление [5].

Коэффициенты биоаккумуляции (табл. 1), рассчитанные для всех грибов, мхов и эпигейных видов лишайников, сравнимы с данными, представленными в литературе [1, 3, 6]. K_6 ртути для растительности суши составляет 7,58, что говорит о ее биологическом накоплении [5]. K_6 всех исследованных грибов, за исключением белых грибов, дождевиков, груздей и моховиков, свидетельствует о биологическом захвате ртути. Коэффициент биоаккумуляции у моховиков, а также у груздя говорит о накоплении ртути, а у дождевиков и белых грибов – об интенсивном накоплении Hg.

Таблица 1

Содержание ртути в биообъектах Томской области

Место отбора пробы	Природный объект	Hg, нг/г	$K_6 = \text{CHg}_{\text{раст}} / \text{CHg}_{\text{почв}}$
Томская область	груздь	14-118/71	0,2-1,24
	дождевик	1271-3250/2241	26,3
	подберезовик	110-171/137	0,3
	моховик	37-107/84	0,31-1,5
Томск	подберезовик	/134	0,77
	моховик	/56	0,67
	масленок	23-38/31	0,27-0,45/0,37
	груздь	/112	1,33
	белый гриб	2200-705/1453	24,44-7,83/16,14
	рыжик	336-70/198	
	сморчок	/46	
	опенок	505-70/264	6,01-0,83/3,14
Томская область	сыроежка	299	3,55
	эпигейные	35-95/59	0,37-1,01
Томская область	эпифитные	233-366/291	
	сфагнум	27-90/58	0,39-1,03

Годовые кольца деревьев. Исследования содержания ртути проводились в образцах древесины тополя и сосны обыкновенной, произрастающих в зоне непосредственного влияния города Томска (тополь – центр города) и Северска (28 км от г. Томска). Полученные данные показали наличие концентраций ртути в древесине всех образцов, не превышающих фоновые значения (фоновое значение для наземных растений составляет 30-700 нг/г) [4, 10]. Начиная со второй половины XX в. концентрация ртути в древесине тополя (рис. 1) возрастала и достигла пика в 1995 г. (213 нг/г), с 1995 по 1998 г. отмечается некоторое

понижение содержания ртути, а начиная с 1999 г. содержание металла вновь увеличивается. В годичных кольцах первой сосны (Самусь) максимальное содержание ртути отмечается в 1977 году (163 нг/г) и в 1989 г. (261 нг/г) – вторая сосна (Ярское). Общий вид кривой концентрации ртути в древесине сосны отражает ту же направленность, что и в древесине тополя – постепенное увеличение к концу XX века. Результаты анализа содержания ртути в древесине за период с 1970 по 1992 год не показали отличия в накоплении поллютанта, в зависимости от породы дерева, хотя в литературе приводятся данные о большем накоплении ртути хвойными породами деревьев [2]. В тополе среднее содержание ртути составило 94 нг/г, в соснах – 80 нг/г и 119 нг/г, соответственно. Считается, что кора деревьев накапливает загрязнители гораздо интенсивнее, чем остальные органы и ткани растений. В данных исследованиях такой зависимости не обнаружено.

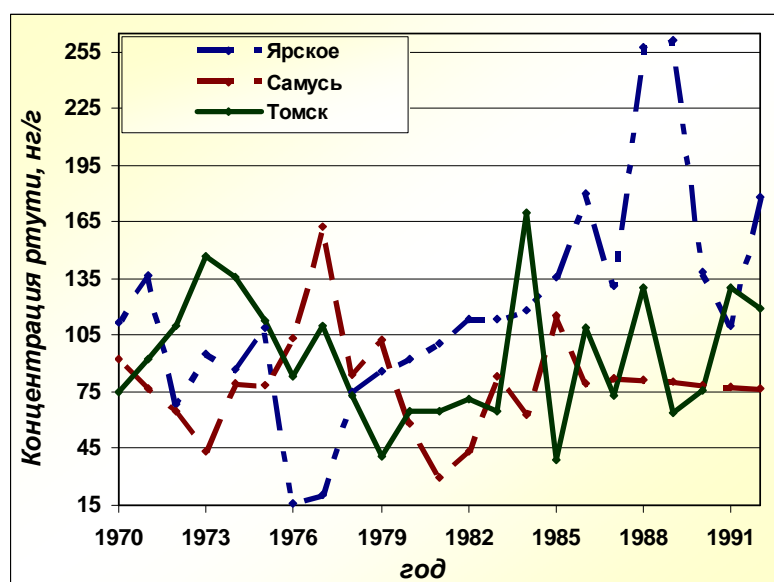


Рис. 1. Сводный график содержания ртути в древесине тополя и сосны, нг/г

Следует отметить постепенное увеличение содержания ртути к концу XX в. в древесине всех исследованных деревьев, а также уменьшение ширины годичных колец, однако результаты корреляционного анализа показали отсутствие связи между этими показателями.

По данным корреляционного анализа не обнаружено взаимосвязи между температурой воздуха, количеством осадков и содержанием ртути в годовых кольцах исследуемых деревьев. За исключением первой сосны (Самусь), где количество измеренной ртути в древесине имеет значимую положительную корреляцию с осадками ($r=0,683$).

Процессы сорбции, перераспределения аккумуляции загрязнителей сосудистыми растениями достаточно сложны и зависят от факторов, число которых гораздо больше, чем в случае грибов, лишайников и мхов. При нескольких путях поступления ртути в растения,

основным является атмосферный, по данным отношения количества ртути, накопленной через корни, к ее содержанию, адсорбированному листьями [9].

Хвоя. Сравнение среднего содержания Hg в хвое разных пород деревьев (кедр, пихта, ель, сосна) показало, что максимальное содержание Hg 315 нг/г характерно для хвои сосны, хотя концентрация меняется в довольно широких пределах от 49 до 315 нг/г.

В ходе исследования проб разновозрастной хвои, собранной с разных пород деревьев, выросших в разных экологических условиях, было выявлено, что слабо выраженная закономерность накопления ртути в хвое в зависимости от места произрастания наблюдаются в хвое сосны. Максимальные концентрации отмечаются у сосен на открытых участках, минимальные – под пологом смешанного леса. Кедр, можжевельник, пихта, ель – разные породы деревьев, произрастающие на одном участке – в заболоченном высокорослом смешанном лесу. Сравнение содержания ртути в разных породах деревьев, произрастающих на данном участке, показало, что максимальное накопление ртути характерно для ели – 164 нг/г, минимальное для кедра и можжевельника – 79 нг/г. Наиболее высокие средние концентрации ртути отмечается в хвое ели (165 нг/г), наименее – в хвое можжевельника (79 нг/г). Средняя концентрация ртути в хвое кедра составляет 99 нг/г, а средние значения для хвои сосны (115 нг/г) близки к хвое можжевельника (112 нг/г).

Известно, что в хвое сосен и кедров содержание ртути увеличивается по мере ее старения [9]. В наших исследованиях возрастные отличия в концентрации Hg хвоей выражены слабо, за исключением кедра. Следует отметить, что в среднем во всех исследованных образцах хвои больше всего ртути содержится в хвое четырехлетнего возраста, а меньше всего – в трехлетней.

Для выявления зависимости концентрации ртути в хвое от климатических показателей, таких как температура воздуха и количество осадков за вегетационный период (май-сентябрь), были рассчитаны коэффициенты корреляции. Стоит отметить, что с повышением температуры увеличивается содержание ртути в хвое кедра ($r=0,87$). С понижением температуры увеличивается концентрация ртути в хвое ели ($r=-0,99$) и можжевельника ($r=-0,99$). Взаимосвязи с осадками нет.

Основными особенностями определения содержания ртути в сосудистых растениях являются: различия в процессе поглощения поллютанта из атмосферы или почвы, а также особенностями перераспределения его между тканями и органами растения; зависимость, как от возраста частей растения, так и возраста самого растения; достоверность данных о содержании поллютанта в растениях сильно зависит от пространственно-временных условий окружающей среды, а также от сезонных колебаний этих параметров [9].

Заключение

В результате проведенных исследований по изучению содержания и особенностей накопления ртути в растениях на территории Томской области выявлено, что содержание ртути соответствует данным, полученным другими исследователями как на территории Западной Сибири и России, так и в мире. При этом наиболее предпочтительными в качестве биоиндикаторов ртутного загрязнения являются эпифитные виды лишайников и сфагновые мхи. Механизмы накопления ртути деревьями изучены недостаточно и требуют дальнейшего исследования. Хвоя отражает ртутную нагрузку за ограниченный период времени (максимум 5 лет). Грибы вызывают интерес для исследования накопления ими ртути с точки зрения употребления в пищу.

Необходимость исследования содержания ртути в растениях определяется еще и тем фактом, что они способны выделять ртуть в воздух в виде летучего соединения – диметил ртути со скоростью до 250 мг/кг сырой массы в час [9]. А при возникновении лесных пожаров выделяется до 41, 5 % ртути, накопленной растениями [6], что вносит дополнительный вклад в региональный баланс ртути.

Список литературы

1. Аношин Г.Н., Маликова И.Н., Ковалев С.И. и др. Ртуть в окружающей среде юга Западной Сибири // Химия в интересах устойчивого развития. – 1995. – Т. 3, № 1–2. – С. 69-111.
2. Большаков А.П., Дьякова Н.И., Птушко Л.И и др. К фитогеохимии ртути / Биогеохимия растений. Труды бурятского института естественных наук. – 1969. – Вып. 2. – С. 183-189.
3. Исидоров В.А. Введение в экохимическую токсикологию: учебное пособие. – СПб.: Химиздат, 1999. – С.144.
4. Лапердина Т.Г. Определение ртути в природных водах. – Новосибирск: Наука, 2000. – С. 10-20, 77-124, 147-152.
5. Летувнинкас А.И. Антропогенные геохимические аномалии и природная среда: учебное пособие. – Томск: Изд-во НТЛ, 2002. – С. 290.
6. Ляпина Е.Е., Головацкая Е.А., Ипполитов И.И. Исследование содержания ртути в природных объектах Западной Сибири // Сибирский экологический журнал. – 2009. – №1. – С. 3-8.
7. Свирко Е.В., Страховенко В.Д. Тяжелые металлы и радионуклиды в слоевищах лишайников в Новосибирской области, Алтайском крае и республике Алтай // Сибирский экологический журнал. –2006. – № 3. – С. 385-390.

8. Черненкова Т.В. Реакция лесной растительности на промышленное загрязнение. – М.: Наука, 2002. – С. 191.
9. Янин Е.П., Артамонова В.Г., Полканова Е.К. Ртуть. Комплексная система безопасности // Сборник материалов III-й научно-технической конференции. – СПб., 1999. – С. 26, 125.

Рецензенты:

Ипполитов И.И., д.ф.-м.н., ФГБУН Института мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск;

Языков Е.Г., д.г.-м.н., профессор кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Томского политехнического университета, г. Томск.