

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/19>

УДК 630+581.54; 500-599.55; 364.181.228



Эколого-геохимические особенности накопления ртути древесиной хвойных растений на территории Алтайского края

Елена Е. Ляпина ✉, eeldv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6116-0567>

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

Определение уровня ртутной нагрузки на территорию Алтайского края проводилось методом дендрогеохимии. Территория исследования расположена на северо-западе Алтайского края в пределах Кулундинской равнины. Исследованные деревья представлены сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и лиственницей сибирской (*Larix sibirica* L.). Средние концентрации ртути в древесине всех исследованных деревьев варьируют в широком диапазоне: 2–493 нг/г. Максимальные средние содержания отмечаются в крайних точках отбора: юг и север - на периферии района опробования. Исследования охватывают временной интервал: 1952–2018 гг. Отмечается период со значительным повышением среднего содержания ртути в годичных кольцах с 1957 по 1990 гг., после которого произошло резкое снижение концентрации элемента. Многочисленные экстремумы отмечаются в интервале: 1978–1988 гг. Расчеты геоэкологических параметров ртутной нагрузки на территорию исследований показали превышение содержаний ртути в годичных кольцах над фоновыми значениями, а также кларком ноосферы, средним для наземных растений и живого вещества. Похожим характером аккумуляции ртути в древесине характеризуются практически все исследованные деревья. Выявлена связь в накоплении ртути древесиной хвойных деревьев с субстратом, а также хвоей. Ртуть, накопленная хвоей, влияет на концентрации элемента в хвойной подстилке, опосредованно на уровень поллютанта в субстрате. Высокая доля биодоступных форм ртути в темно-каштановых почвах и южных черноземах. При накоплении элемента важно учитывать количество и продолжительность осадков, как в течение года, так и за вегетационный период.

Ключевые слова: Hg, сосна обыкновенная, *Pinus sylvestris* L., лиственница, *Larix sibirica* L., годовые кольца, Алтайский край, геоэкология, дендрогеохимия

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российской академии наук в рамках государственного задания Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН.

Благодарности: автор благодарит рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Ляпина Е. Е. Эколого-геохимические особенности накопления ртути древесиной хвойных растений на территории Алтайского края / Е. Е. Ляпина // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 4 (52). – Ч. 2. – С. 95–109. – Библиогр.: с. 105–109 (36 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/19>.

Поступила 01.11.2023. Пересмотрена 01.12.2023. Принята 01.12.2023. Опубликована онлайн 16.01.2024

Article

Ecological and geochemical features of mercury accumulation in coniferous wood in the Altai Region

Elena E. Lyapina ✉, eeldv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6116-0567>

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IMCES SB RAS). 10/3, Akademicheskoy ave.. Tomsk, 634055, Russian Federation

Abstract

Determination of the level of mercury load on the territory of the Altai Region was carried out using the dendrogeochemistry method. The study area is located in the north-west of the Altai Region within the Kulunda Plain. The studied trees were represented by Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and siberian larch (*Larix sibirica* L.). The average concentrations of mercury in the cores of all studied trees vary in a wide range: 2-493 ng/g. The maximum average contents are observed at the extreme sampling points: south and north - on the periphery of the sampling area. The research covers the time interval: 1952-2018. There is a period with a significant increase in the average mercury content in tree rings from 1957 to 1990, after which there was a sharp decrease in the concentration of the element. Numerous extremes are observed in the interval: 1978-1988. Calculations of geoecological parameters of mercury load in the study area showed an excess of mercury content in tree rings above background values, as well as the noosphere clarke, average for terrestrial plants and living matter. Almost all studied trees are characterized by a similar pattern of mercury accumulation in trees. A connection was revealed in the accumulation of mercury in wood cores of coniferous trees with the substrate, as well as pine needles. Mercury accumulated by pine needles affects the concentration of the element in the pine litter, and thereby the level of pollutant in the substrate. A high proportion of bioavailable forms of mercury in dark chestnut soils and southern chernozems. When accumulating an element, it is important to take into account the amount and duration of precipitation both during the year and during the growing season.

Keywords: *Hg, Pinus sylvestris* L., *Scots pine, Larix sibirica* L., *Siberian larch, tree rings, Altai Region, geoecology, dendrogeochemistry*

Funding: The study was carried out with financial support from the Russian Academy of Sciences within the framework of a state assignment from the Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IMCES SB RAS).

Acknowledgments: the author of the reviewers for their contribution to the peer review of the article.

Conflict of interest: The author(s) declare no conflict of interest.

For citation: Lyapina E. E. (2023) Ecological and geochemical features of mercury accumulation in coniferous wood in the Altai Region. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 4 (52), part 2, pp. 95-109 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/19>.

Received 01.11.2023. **Revised** 01.12.2023. **Accepted** 01.12.2023. **Published online** 16.01.2024

Введение

Выбор ртути для изучения содержания и распределения в древесине обусловлен ее принадлежностью к I классу опасности, согласно СанПиН

1.2.3685-21 [17]. Кроме того, ртуть относится к сильно ядовитым элементам для растений. Необходимо контролировать содержание ртути в продуктах питания согласно Пищевому кодексу междуна-

родных стандартов ООН и ВОЗ [13]. Ртуть высокотоксична и отличается повышенной миграционной способностью, постоянно трансформируется в непрерывно меняющихся условиях окружающей среды [1, 20, 27]. Является представителем группы тиоловых ядов, мутагенна, в почве, водных объектах и атмосферном воздухе метилирует с образованием высокотоксичных соединений [5, 30]. Источники поступления ртути в компоненты окружающей среды как природные: дегазация земной коры, рифтогенез, испарение с поверхности мирового океана, месторождения полезных ископаемых, землетрясения и извержения вулканов; так и антропогенные: предприятия цветной металлургии, добыча и обогащение руды, мусоросжигающие заводы, топливно-энергетический комплекс и др. [1, 2, 5, 20, 24, 27, 30].

Записи годичных колец являются хорошо зарекомендовавшими себя показателями прошлых климатических изменений и широко используются для реконструкции температуры, осадков, речного стока и других параметров окружающей среды [23].

Из-за широкого распространения сосны в мире исследователи предпринимают попытки, с разной степенью успеха, сделать выводы о прошлых изменениях в загрязнении окружающей среды и атмосферы на местном и региональном уровнях, используя дендрохимический анализ микроэлементов [23, 25].

Дендрогеохимия позволяет определить уровень накопления микроэлементов в годичных кольцах деревьев, а также дифференцировать азальный и корневой путь их поступления и накопления в растительных тканях. В настоящее время остается открытым вопрос минеральных парагенезисов, связанных с флоэмным и ксилемным потоками вещества в растениях. Дендрогеохимические исследования позволяют оценить геоэкологическую обстановку за довольно продолжительный период. Метод малоинвазивный, не требует дорогостоящего оборудования и специальных навыков [11]. Данные, полученные при помощи изучения вещественного состава древесины, позволяют выявить факторы, определяющие изменчивость годового прироста древесины, датировать события, влияющие на прирост древесных растений, реконструировать

условия внешней среды, а также оценить экологическую обстановку территории исследования [23, 25, 26, 34, 35]. В настоящее время ученые широко используют метод дендрогеохимии для получения информации о концентрациях ртути и других химических элементов, а также источниках их поступления в древесину и выявления факторов, влияющих на аккумуляцию поллютантов древесными растениями [12, 15, 16, 27, 28, 33]. Годовые кольца напрямую фиксируют концентрации газообразной элементарной ртути в атмосфере (Hg^0), в отличие от других архивов, которые в основном фиксируют отложения ртути в окисленных, растворимых формах ртути (Hg^{II}), таких как керны озерных отложений, торфяные керны и керны льда [23, 30]. Текущее понимание путей поглощения и сохранения ртути внутри деревьев, хотя и улучшается, все еще ограничено. Существует три потенциальных пути поступления ртути в деревья: через листья (через устьица или кутикулу), корни и кору. При этом поступление через кору и корни минимально. Однако необходимо учитывать формы нахождения элемента в почвах и их биодоступность [2, 28, 34]. Ртуть, попадая в годовые кольца сосны, не перераспределяется в новые ткани с началом нового вегетационного периода [26].

На ассимиляцию ртути деревьями влияют относительная влажность воздуха и такие факторы, как высота дерева, возраст дерева, динамика кроны и площадь листьев [33]. Отдельно стоит отметить влияние природных факторов, таких как, рельеф, геохимическая обстановка и климатическая характеристика района исследования [9, 15, 16].

Использование древесины сосны в дендрогеохимии распространено из-за широкого ареала ее произрастания, однако данные, полученные с помощью древесины лиственницы в мировой практике, считаются наиболее достоверными [28, 30, 34].

Материалы и методы

Дендрогеоэкологические исследования проводились на территории северо-запада Алтайского края (г. Славгород, с. Кулунда, Табуны, Гришковка и Бурла). Район исследования расположен в пределах Кулундинской равнины, относящейся к Западно-Сибирской равнине. Кулундинская равнина является аллювиальной равниной на юге Западной

Сибири, расположена на высоте 120 метров над уровнем моря. Ландшафты степные: на севере и востоке — злаковые степи на южных чернозёмах, на юге и западе — полынно-злаковые на каштановых почвах лёгкого механического состава [14]. Рельеф местности равнинный. Точки отбора проб окружены полями.

Алтайский край является одним из крупнейших аграрных регионов России, на территории которого традиционно производится зерновая и молочно-мясная продукция. Производится сбор лекарственных трав и дикоросов (грибы, ягоды, травы). Ведется заготовка кормов для животноводства. Производится мед и медопродукты [14]. Антропогенное воздействие оказывают предприятия химической промышленности (ОАО «Алтайхимпром», г. Яровое, объект включен в государственный реестр объектов накопленного вреда Минприроды России [14]), топливно-энергетического комплекса (котельные, преимущественно печное отопление), автомобильные дороги федерального значения и железные дороги (тепловозы), населенные пункты (отсутствие централизованной системы водоотведения, свалки), а также многолетнее внесение удобрений, фунгицидов и гербицидов (в том числе гранозана). Существенный вклад в поступление ртути может вносить трансграничный перенос со стороны сопредельного государства (Республика Казахстан: (ТОО «ХИМПРОМ 2011» г. Павлодар, Семипалатинский испытательный полигон) [8, 14, 16].

Пробы древесины хвойных деревьев отбирали вдоль автомобильных шоссе и железнодорожных путей субширотного направления (с юга на север), проходящих через населенные пункты г. Славгород, с. Кулунда, Табуны, Гришковка и Бурла в летний период 2018 г. Расстояние от автомобильных и железных дорог составляло порядка 50-100 м. На территории северо-запада Алтайского края нет естественных хвойных лесов, пробы отбирались с деревьев, произрастающих в пределах хвойных и смешанных лесополос. В лесопосадках наиболее распространена сосна. Возраст деревьев варьирует от 40 до 70 лет. Отбор проводился с деревьев на высоте 1 м от поверхности земли в ясную

погоду. Древесный керн извлекали приростным буром с 3-х рядом стоящих деревьев примерно одного возраста, высоты и диаметра ствола, согласно [11]. Исследованные деревья представлены сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и лиственницей сибирской (*Larix sibirica* L.).

Выделение границ годовых колец выполняли на приборе LINTAB с программным обеспечением TSAP-Win и Lignovision в лаборатории динамики и устойчивости экосистем Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск).

Содержание ртути в пробах определяли в учебно-научной лаборатории на базе Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета методом атомно-адсорбционной спектроскопии с помощью ртутного анализатора РА-915+ с пиролитической приставкой ПИРО-915. Разложение проб проводилось в атомизаторе прибора при температуре 850°C (метод пиролиза). Точность определения ртути 5 нг/г [2, 36]. Достоверность результатов аналитических исследований подтверждалась внутренним контролем. Концентрацию ртути рассчитывали на 1 г сухого вещества. Всего отобрано 15 кернов, выделено и проанализировано порядка 550 годовых колец.

Методика обработки результатов включала расчет эколого-геохимических показателей: K_c – коэффициент концентрации относительно фона (8,4 нг/г) [3], ВДК – временно допустимая концентрация; K_N – кларк ноосферы (180 нг/г) [1]; K_{LM} – коэффициент концентрации относительно среднего для живого вещества (50 нг/г) [1]; K_{LP} – коэффициент концентрации относительно среднего для наземных растений (15 нг/г) [32]; K_b – коэффициент биоаккумуляции (собственные данные).

Для оценки влияния климата на накопление ртути деревьями использовали среднесуточные данные по метеостанции Славгород за период с 1951 по 2018 гг. (<http://meteo.ru/>). Оценивали зависимость накопления ртути древесиной хвойных пород деревьев от следующих метеорологических параметров: температуры воздуха и количества осадков как в течение года, так и за вегетационный

период, а также в периоды при положительных и отрицательных температурах. Также оценивалось влияние накопления влаги в течение зимнего периода на вегетацию последующего года.

Статистическая обработка результатов выполнена с использованием программного пакета Statistica.

Результаты и обсуждения

Концентрации ртути в древесине сосны и лиственницы на территории исследования характеризуются высокой вариабельностью как в пределах одного дерева, так и по территории исследования. Среднее содержание в древесине сосны составило 39 нг/г, тогда как в лиственнице 27 нг/г.

Распределение содержания ртути в древесине хвойных деревьев на территории опробования носит неравномерный характер, что подтверждается результатами расчета коэффициента вариации (61-354%) (рис. 1).

Средние концентрации ртути в древесине всех исследованных деревьев варьируют в широком диапазоне: от 2 до 493 нг/г (без ураганных значений: от 2 до 246 нг/г) (табл. 1). Максимальные средние содержания отмечаются в точках отбора «Табуны» (юг) и «Бурла» (север). Точки, расположенные между ними («Славгород» и «Гришковка») характеризуются близкими значениями содержания ртути, за исключением проб в районе с. «Кулунда». Концентрации ртути в годичных кольцах данной точки самые минимальные среди всех исследованных деревьев за весь период. При этом стоит отметить, что концентрации в древесине сосны и лиственницы в точке «Кулунда» характеризуются значениями в пределах ошибки измерения (рис. 2). Максимальные пиковые концентрации выявлены в годовых кольцах сосны в точке «Табуны».

В пространственном отношении выявлено увеличение содержания ртути на периферии района исследования. Район расположен в сельскохозяйственном регионе, где идет активная распашка земель, внесение органических и минеральных удоб-

рений, применяются средства защиты растений для выращивания злаковых культур. Повышенные концентрации ртути связаны, скорее всего, с применением пестицидов и гербицидов.

Дендрогеоэкологические исследования охватывают временной интервал с 1952 по 2018 гг. (68 лет). Во всех точках исследования отмечается период со значительным повышением среднего содержания ртути в годичных кольцах с 1957 по 1990 гг. (33 года). Превышение над средним составляет от 1,7 до 3,7 раз. Пики максимальных концентраций ртути в древесине также отмечаются в близком временном интервале с 1978 по 1988 гг. (табл. 1). Период повышенных концентраций ртути в древесине, возможно, связан с деятельностью предприятий химической промышленности как на территории г. Яровое, так и на территории г. Павлодар Республики Казахстан (вследствие переноса преобладающими юго-западными ветрами).

После 1990 г. во всех исследованных деревьях отмечается снижение концентрации до 8-18 нг/г, что тоже гораздо ниже содержаний ртути до 1957 г. По результатам мировых исследований содержания ртути в компонентах окружающей среды, элемент характеризуется снижением коэффициента технофильности [5, 7]. Данная тенденция является следствием внедрения безртутных технологий в производственных процессах и увеличением доли использования вторичной ртути, как на локальном, так и на региональном уровнях. На территории бывшего СССР данный период отмечается также резким спадом промышленно производства.

Расчеты геоэкологических параметров ртутной нагрузки на территорию исследований показали превышение содержания элемента над фоном и временно-допустимой концентрацией в древесине всех хвойных деревьев, за исключением точки «Кулунда». Превышением концентраций ртути в древесине относительно среднего по выборке характеризуются точки «Табуны», «Славгород» и «Знаменка».

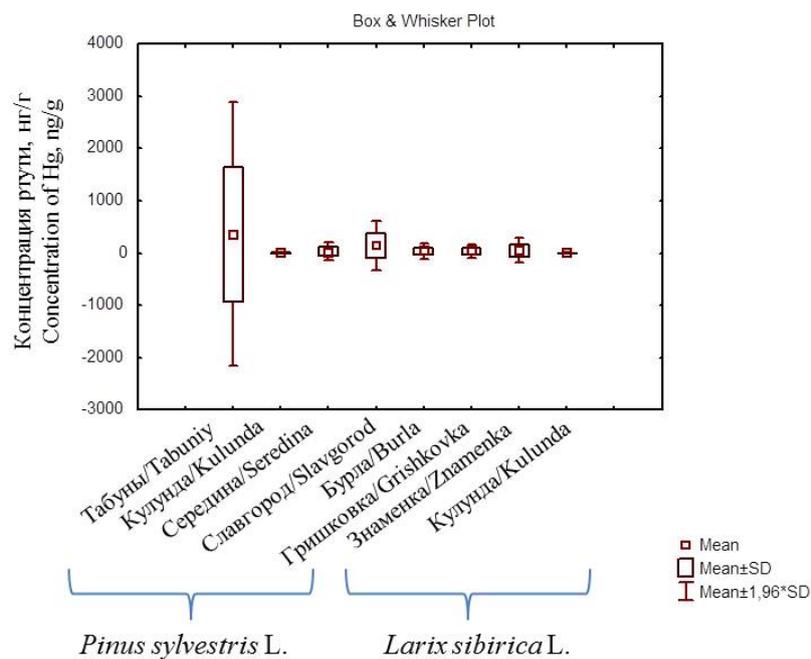


Рисунок 1. Концентрации ртути в древесине хвойных деревьев на территории северо-запада Алтайского края

Figure 1. Mercury concentrations in cores of coniferous trees in the north-west of the Altai Region

Источник: собственные данные автора

Source: author's own data

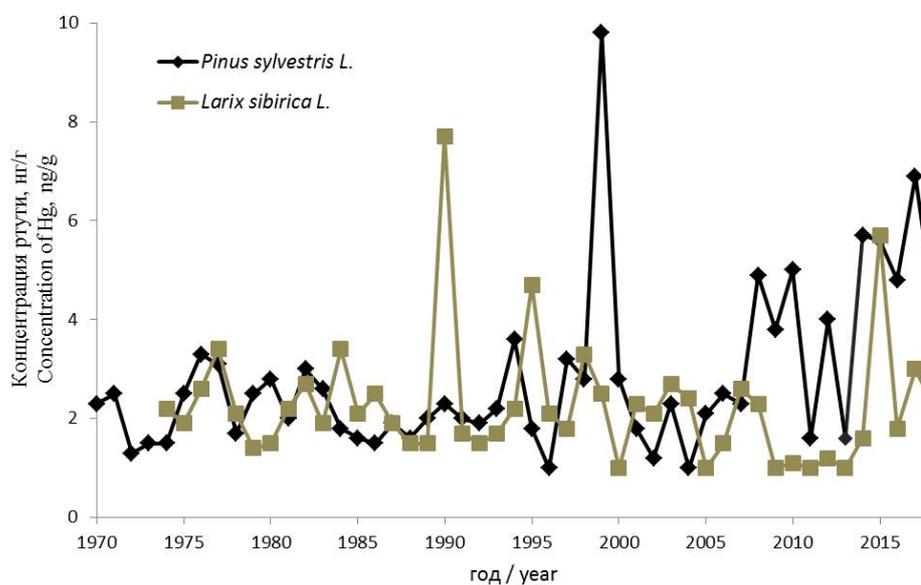


Рисунок 2. Концентрации ртути в древесине хвойных деревьев в точке «Кулунда»

Figure 2. Mercury concentrations in coniferous tree cores at the Kulunda point

Источник: собственные данные автора

Source: author's own data

Особенности ртутной нагрузки на территории северо-запада Алтайского края по данным дендрогеоэкологических исследований

Table 1

Features of mercury load in the north-west of the Altai Region according to dendrogeoecological studies

Пункт отбора проб Sampling point	Среднее содержание ртути, нг/г Average mercury content, ng/g		Пики, год/С _{Hg} , нг/г Peaks, year/С _{Hg} , ng/g	Показатель index					
	Вся выборка Entire sample	Период, год/С _{Hg} , нг/г Period year/С _{Hg} , ng/g		Кс	ВДК ТРС	К _{LP}	К _N	К _{LM}	К _B
<i>Pinus sylvestris L.</i>									
Кулунда Kulunda	3±1	-	1999/10	0,1-1,2/ 0,3	0,1-0,6/ 0,2	0,02-0,2/ 0,1	0,01-0,1/ 0,02	0,1-0,7/ 0,2	0,2
Табуны Tabuniy	493±156	1952-1969/44 1970-1990/1511 1991-2018/18	1984/630 1988/13190	0,1-1570/ 59	0,1-785/ 30	0,02-264/ 9,9	0,01-73,3/ 2,7	0,1-879/ 32,9	3,4
Славгород Slavgorod	54±30,7	1962-1990/97 1991-2018/12	1964/145 1969/575 1973/380 1976/143 1983/1034	0,6-179/ 23	0,3-90/ 11,6	0,1-30,1/ 4	0,3-100,5/ 13	0,03-8,4/ 1,1	0,4
Славгород-Бурла Slavgorod-Burla (Sereditina)	47±10,6	1951-1956/28 1957-1990/82 191-2018/8	1958/1387	0,2-165/ 5,6	0,1-83/ 2,8	0,04-27,7/ 0,4	0,01-7,7/ 0,1	0,1-92,5/ 3	1,1
Бурла Burla	194±9,4	1960-1990/360 1991-2018/11	1961/1057 1969/575 1974/980 1980/539 1989/169	0,5-123/ 6,4	0,3-62/ 3,2	0,1-20,7/ 1,1	0,02-5,8/ 0,3	0,3-69/ 3,6	2,2
Гришковка Grishkovka	35±8,6	1953-1976/13 1977-1989/131 1990-2018/10	1978/386 1980/306 1983/210 1987/115	0,3-46/ 4,2	0,1-23/ 2,1	0,04-7,7/ 0,7	0,01-2,1/ 0,3	0,2-25,7/ 3	1,6
<i>Larix sibirica L.</i>									
Знаменка Znamenka	53±19,7	1984-1993/38	1988/636	0,6-76/ 6,3	0,3-38/ 3,2	0,1-12,7/ 1,1	0,03-3,5/ 0,3	0,2-25,7/ 3	2,4
Кулунда Kulunda	3±1	-	1990/8	0,1-0,9/ 0,3	0,1-0,5/ 0,2	0,02-0,2/ 0,05	0,01-0,04/ 0,01	0,1-0,5/ 0,2	0,2

Примечание: см. объекты и методы / Note: see objects and methods

Источник: собственные данные автора / Source: author's own data

Для определения источника поступления поллютанта в древесину был рассчитан коэффициент биаккумуляции. В древесину хвойных деревьев в точках опробования ртуть поступает из субстрата, за исключением точек «Славгород» и «Кулунда» (сосна и лиственница, соответственно). Высокая

доля биодоступных форм ртути выявлена в темно-каштановых почвах и южных черноземах.

Содержание ртути в почвах на территории исследования варьирует в пределах 14-413 нг/г. Максимальная концентрация выявлена в точке Славгород, минимальная – в точке «Кулунда». Среднее содержание 70 нг/г (без максимума –

21 нг/г). Концентрация ртути в черноземах Кулундинской степи составляет 21 нг/г [6].

Корневая система сосны зависит от почвенных условий. На засушливых и почвах с низким уровнем плодородия, какими являются почвы Кулундинской степи, сосны развивают мощную разветвленную поверхностную корневую систему. Основная масса тонких всасывающих и проводящих корней располагается в верхних 0-20 см почвы. В черноземах общая длина всех корней сосны значительно меньше, чем в песчаных почвах, причем размеры поверхностных корней превышают размеры корней, идущих в глубину: на песке в 6 раз, а на черноземе в 1,5 раза, соответственно [18]. Корневая система лиственницы мощная, разветвленная, без выраженного стержневого корня. При этом наличие сильных, заглубленных на концах боковых корней обеспечивает ветроустойчивость дерева [4].

Ртуть в почвах (во всех исследованных точках отбора древесины) присутствует в биодоступных формах, что подтверждается результатами определения форм нахождения элемента в почвах Алтайского края. Почвы северо-запада Алтайского края характеризуются присутствием ртути в составе органических комплексов (R-Hg-R, R-Hg-Cl, R-Hg-SH, например: метил-, этил-, фенилртуть) и химически связанной формой (HgS, HgO, HgSO₄) [10]. Причиной такого распределения форм нахождения ртути в почвах является многолетнее внесение удобрений, фунгицидов и гербицидов (в том числе гранозана), применение средств защиты растений, деятельность предприятий объектов химического производства как на территории Алтайского края («Алтайхимром»), так и трансграничным переносом с территории соседних районов и Республики Казахстан (ТОО «ХИМПРОМ 2011» г. Павлодар) с учетом преобладающего направления ветра [21, 22, 29].

В результате проведенного корреляционного анализа линейной зависимости в накоплении ртути между точками опробования выявили наиболее сильные связи практически во всех точках (рис. 3), за исключением древесины сосны в точках «Середина» и «Кулунда». Кроме того, определен похо-

жий характер накопления поллютанта как в сосне, так и в лиственнице. Выявленные связи характеризуются положительным знаком. Полученные взаимосвязи указывают на общий источник поступления ртути в годовые кольца.

Для подтверждения данного вывода был проведен факторный и кластерный анализ. Результаты факторного анализа выделил наибольшее влияние двух факторов, суммарное воздействие которых составляет 51 %. Первый фактор оказывает воздействие на поступление ртути в древесину в точках «Славгород», «Знаменка», «Табуны» (знак отрицательный). Вторым фактором также снижает поступление поллютанта в древесину сосны и лиственницы в точке «Кулунда». Кластерный анализ подтвердил похожий характер накопления ртути древесиной лиственницы в точке «Знаменка» и сосны точки «Табуны».

В точках отбора проб древесины сосны и лиственницы проводилось исследование содержания ртути в хвое. Концентрации ртути в хвое изменяются в интервале 6-27 нг/г, составляя в среднем 15 ± 2 нг/г. Наибольшие концентрации определены в хвое сосны в точках «Кулунда» и «Славгород», наименьшие – также в хвое сосны в точках «Табуны», «Середина» и «Бурла». В хвое лиственницы ртуть варьирует в пределах 30-33 нг/г [31].

Обнаружена связь между накоплением ртути древесиной хвойных деревьев и содержанием в субстрате, что подтверждается результатами корреляционного анализа ($r = 0,85$; при $P=0,05$). Похожий характер накопления поллютанта в хвое и древесине сосны выявлен в точке «Гришковка» с 2015 по 2018 г. ($r = 0,51$; при $P=0,05$). Кроме того, ртуть, накопленная хвоей, влияет на концентрации элемента в хвойной подстилке ($r = 0,56$ при $P=0,05$), которая, в свою очередь, определяет уровень поллютанта в субстрате ($r = 0,5$; при $P=0,05$).

Связи между накоплением элемента древесиной и подстилкой, а также хвоей и субстратом не обнаружено.

При оценке влияния климата на аккумуляцию ртути деревьями выявлена прямая взаимосвязь с суммой осадков за год в сосне точки «Гришковка» ($r = 0,5$; при $P=0,05$). Кроме того в данной точке

на поступление элемента влияют осадки, накопленные в течение зимнего периода. Для подтверждения данного вывода применили кластерный анализ и построили дендрограмму корреляционной матрицы концентрации ртути и метеопараметров (рис. 4). Дендрограмма иллюстрирует, что в первую очередь на накопление ртути древесиной всех исследованных деревьев влияние оказывает количество и продолжительность осадков. Наиболее сильно на поступление ртути в древесину сосны в точках «Гришкова» и «Середина» влияют количество и продолжительность осадков в зимний период. Вторым фактором, оказывающим воздействие на аккумуляцию ртути всеми исследованными деревьями, является сумма осадков в течение года, вегетационного периода и при положительных температурах. А также количество дней с осадками в течение этих периодов. В условиях сухого климата степной зоны особо стоит отметить важность влия-

ния накопленной влаги в течение зимних периодов как на вегетацию растений, так и на аккумуляцию ими ртути.

С 1951 по 2018 гг. наблюдается повышение температуры как в за год, так и в течение вегетационного периода. Увеличивается не только температура воздуха, но и продолжительность периода с положительными температурами. Количество осадков наоборот снижается. При этом продолжительность осадков при положительных температурах увеличивается, а при отрицательных снижается. Отдельно стоит отметить, что во временном интервале с повышенными концентрациями ртути в древесине (1957-1990 гг.), отмечается наибольшая сумма осадков за год и их продолжительность, а также сумма осадков в течение зимнего периода. Данная тенденция подтвердилась в расчетах, представленных на рис. 4.

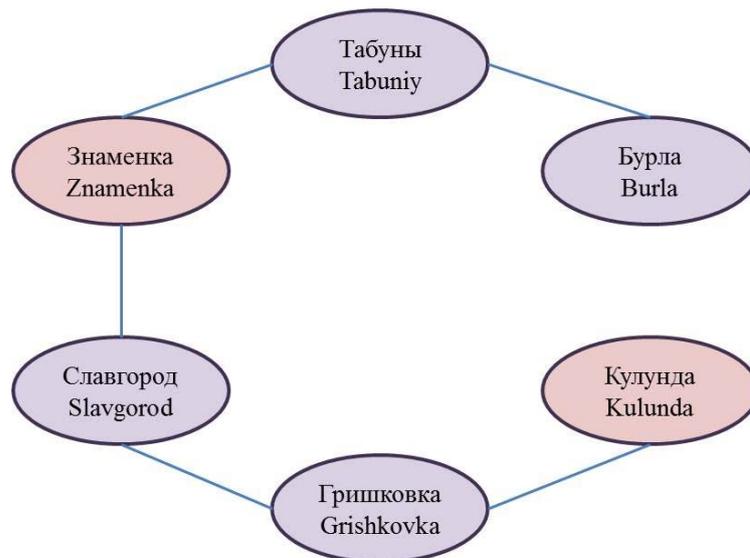


Рисунок 3. Графы ассоциаций ртути в древесине хвойных пород Алтайского края (r 0,5; при $P = 0,05$; знак положительный); сиреневый фон - *Pinus sylvestris* L., розовый фон - *Larix sibirica* L.

Figure 3. Graphs of mercury associations in cores of coniferous trees in the Altai Region (r 0.5; at $P = 0.05$; positive sign); lilac background - *Pinus sylvestris* L., pink background - *Larix sibirica* L.

Источник: собственные данные автора

Source: author's own data

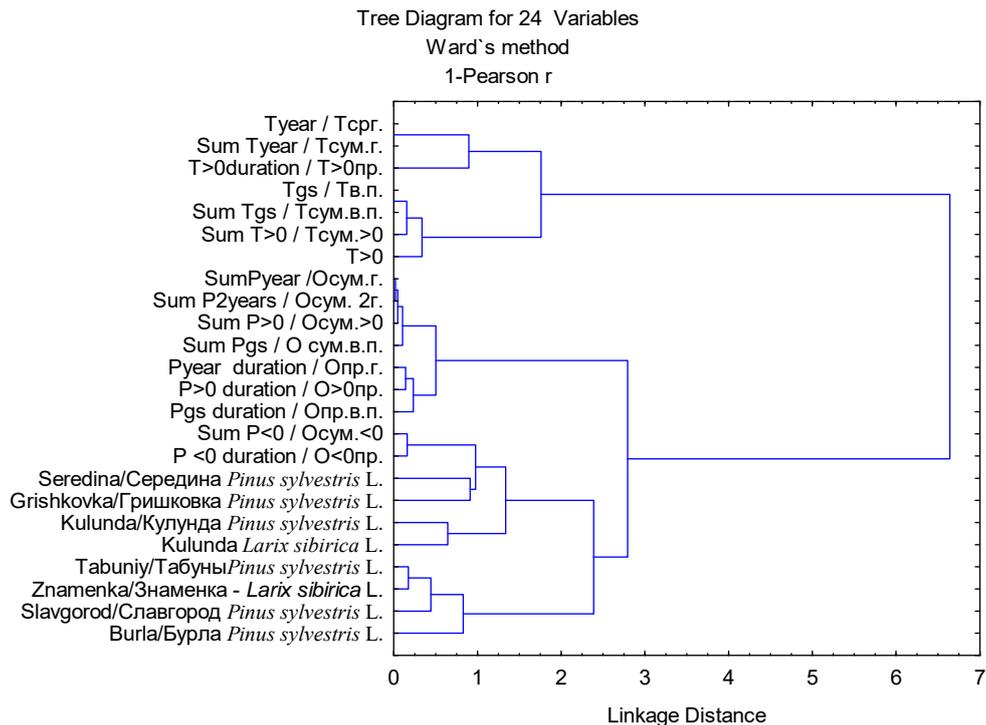


Рисунок 4. Дендрограмма корреляционной матрицы влияния климатических параметров на поступление ртути в древесину хвойных деревьев северо-запада Алтайского края, показатели:

Температура: Тср.г. – среднегодовая; Тв.п. – за вегетационный период; Т>0; Тсум.г – сумма за год; Тсум.в.п.- сумма за вегетационный период; Тсум.>0 – сумма положительных температур; Т>0пр. – продолжительность периода с положительными температурами;

Осадки: Осум.г. – сумма за год; Осум. 2г – сумма за 2 зимних периода; Осум. в.п. – сумма за вегетационный период; Осум.>0 сумма при положительных температурах; Осум.<0 – сумма при отрицательных температурах; Опр.г – количество дней с осадками в течение года; Опр.в.п – количество дней с осадками в течение вегетационного периода; О>0пр. – количество дней с осадками при положительных температурах; О<0пр. – количество дней с осадками при отрицательных температурах

Figure 4. Dendrogram of the correlation matrix of the influence of climatic parameters on the entry of mercury into the wood of coniferous trees in the north-west of the Altai Region, indicators:

Temperature: Tyear - average annual; Tgs – during the growing season; T>0; Sum Tyear – amount for the year; Sum Tgs - amount for the growing season; Sum T>0 – amount for the positive temperatures; T>0duration – duration of the period with positive temperatures;

Precipitation: SumPyear – amount for the year; Sum P2years – amount for 2 winter periods; Sum Pgs – amount for the growing season; Sum P>0 amount for the positive temperatures; Sum P<0 – amount for the negative temperatures; Pyear duration – number of days with precipitation during the year; Pgs duration – number of days with precipitation during the growing season; P>0 duration – number of days with precipitation at positive temperatures; P <0 duration – number of days with precipitation at subzero temperatures

Источник: собственные данные автора

Source: author's own data

Заключение

Среднее содержания ртути в древесине сосны и лиственницы на территории северо-запада

Алтайского края составляет 39 и 27 нг/г, соответственно. Концентрации элемента в точках: «Славгород», «Бурла», «Табуны», «Знаменка» и «Гриш-

ковка» значительно превышают фоновые значения, а также кларк ноосферы, среднее для наземных растений и живого вещества.

Выявлен похожий характер поступления ртути в древесину сосны в точках: «Славгород», «Знаменка», «Табуны»; сосны и лиственницы в точке «Кулунда», лиственницы – в точках «Кулунда» и «Знаменка».

Обнаружена связь в накоплении ртути древесиной хвойных деревьев с субстратом. Синхронно аккумулируют ртуть хвоя и древесина сосны в точке «Гришковка». Кроме того, ртуть, накопленная хвоей, влияет на концентрации элемента в хвойной подстилке, которая, в свою очередь, определяет уровень поллютанта в субстрате.

Высокая доля биодоступных форм ртути выявлена в темно-каштановых почвах и южных черноземах.

Среди климатических характеристик важным при накоплении элемента является количество

и продолжительность осадков как в течение года, так за вегетационный период. Стоит отметить важность влияния накопленной влаги в течение зимнего периода, как на вегетацию растений, так и на аккумуляцию ими ртути.

Источниками антропогенной нагрузки могут выступать предприятия химического цикла, авто- и железнодорожный транспорт (поток туристов и отдыхающих в летнее время, тепловозы, работающие на угле и мазуте), населенные пункты (отсутствие централизованной системы водоотведения, свалки), а также многолетнее внесение удобрений, фунгицидов и гербицидов (в том числе гранозана).

Южная часть Западно-Сибирского экономического района подвержена влиянию промышленных районов Казахстана, а именно городов: Павлодар, Экибастуз и Усть-Каменогорск. Одновременно промышленный пояс юга Сибири оказывает влияние на территорию Республики Казахстан.

Список литературы

1. Алексеенко В.А. Экологическая геохимия : учебник / В.А. Алексеенко. – Москва : Логос, 2000. – 627 с.
2. Аношин Г.Н. Ртуть в окружающей среде юга Западной Сибири / Г.Н. Аношин, И.Н. Маликова, С.И. Ковалев // Химия в интересах устойчивого развития. 1995. - т.3. - № 1-2. – С. 69-111.
3. Содержание ртути в почвах и биологических объектах природных и техногенных территорий / А.Г. Горохова, А.И. Иванов, Н.А. Язынина [и др.] // Теоретическая и прикладная экология. 2017. – № 4. – С. 100–105.
4. Гудаева Е.А. Влияние эколого-географических условий роста на биостойкость и строение древесины лиственницы сибирской: специальность 03.00.16 «Экология» : дис. канд. с.-х. наук: защищена 23.12.2005 / Гудаева Елизавета Анатольевна; СГТУ. – Красноярск, 2004. – С. 185.
5. Ермаков В.В. Биогенная миграция и детоксикация ртути / В.В. Ермаков // Ртуть в биосфере: эколого-геохимические аспекты: материалы международного симпозиума. – Москва, 2010. - С. 5-14.
6. Фоновое количество тяжелых металлов в почвах юга Западной Сибири / В.Б. Ильин, А.И. Сысо, Н.Л. Байдена [и др.] // Почвоведение. 2003. - №5. - С. 550-556.
7. Касимов Н.С. Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии / Н.С. Касимов, Д.В. Власов // Вестник московского университета. Сер. 5 География. 2015. - №2. - С. 7–17.
8. Ключев Н.Н. Экологические итоги реформирования России / Н.Н. Ключев // Вестник Российской академии наук. 2001. - Т. 71. - № 3. - С. 233–239.
9. Ляпина Е.Е. Содержание ртути в хвое Юго-Западного Прибайкалья / Е.Е. Ляпина, Е.В. Шворнева, Н.Н. Воропай // Оптика атмосферы и океана. 2018. – 31. - №1. - С. 69-72.
10. Ляпина Е.Е. Распределение форм нахождения ртути в профиле типичных почв южной Сибири / Е.Е. Ляпина // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2021. - Т 2. - №2. - С. 130-136.
11. Матвеев С.М. Дендрохронология: учебное пособие / С.М. Матвеев, Д.Е. Румянцев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Воронеж, 2013. – 140 с.

12. Годовые кольца сосны обыкновенной (*Pinus Sylvestris* L.) – Индикатор геохимической обстановки и хронологического изменения химического элементного состава окружающей среды / А.С. Миронова, Л.П. Рихванов, Н.В. Барановская [и др.] // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. - Т. 331. - № 1. – С. 106–116.
13. Недошитова А.В. Обсуждение зарубежного опыта определения токсичных элементов в пищевых продуктах / А.В. Недошитова, М.В. Волкова // X Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием: материалы конференции. Том 2, 2020 г. – Пермь. - С. 175–179.
14. Попрядухин В.Н. Основные экологические проблемы Алтайского края и пути их решения / В.Н. Попрядухин // Роль Алтайского края в экологическом каркасе Российской Федерации: сборник тезисов научно-практической конференции. – Барнаул, 2017. – С. 6-8.
15. Дендрогеохимические особенности ископаемой лиственницы (урочище Пазырык) и современных лиственниц Горного Алтая / Л.П. Рихванов, Ю.В. Робертус, А.С. Миронова [и др.] // Известия Томского политехнического университета. 2017. - №6. - С. 108-119.
16. Индикация компонентами природной среды трансграничного переноса загрязняющих веществ на территорию Горного Алтая / Ю.В. Робертус, В.Н. Удачкин, Л.П. Рихванов [и др.] // Известия Томского политехнического университета. 2016. – Т. 327. – № 9. – С. 39–48.
17. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. Минюст РФ: 29.01.2021. – Москва, 2021. – 469 с.
18. Тюкавина О.Н. Корневая система сосны обыкновенной в условиях северо-таежной зоны // О.Н. Тюкавина, Е.Н. Евдокимов // Лесной журнал. 2016. - №1. – С. 55-65.
19. Черненко Т.В. Реакция лесной растительности на промышленное загрязнение / Т.В. Черненко // Москва : Наука, 2002, с. 191.
20. Янин Е.П. Ртуть в окружающей среде промышленного города / Е.П. Янин. – Москва, 1992. – С. 3-63.
21. Arun Dev Singh, Kanika, Jaspreet Kour Critical review on biogeochemical dynamics of mercury (Hg) and its abatement strategies. Chemosphere 319(26):137917 2023, DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.137917
22. Cataldo D.A., Wildung R.E. Soil and plant factors influencing the accumulation of heavy metals by plants. Perspectives of Environmental Hygiene. 1978. V. 27. P. 149–159.
23. Chellman N, Csank A., Gustin M.S. et al. Comparison of co-located ice-core and tree-ring mercury records indicates potential radial translocation of mercury in whitebark pine. Science of The Total Environment. 743(15). 2020. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140695.
24. Clackett S.P., Porter T.J., Lehnerr I. 400-Year Record of Atmospheric Mercury from Tree-Rings in Northwestern Canada. Environmental Science & Technology. 2018. 52(17). 9625–9633. DOI: doi.org/10.1021/acs.est.8b01824.
25. Gacnik J., Gustin M.S. Tree rings as historical archives of atmospheric mercury: A critical review. Science of The Total Environment. 2023. 898(10) doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165562.
26. Gustin M.S., Dunham-Cheatham S.M., Harper J.F. et al. Investigation of the biochemical controls on mercury uptake and mobility in trees. Science of The Total Environment 2022. 851(1). doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158101.
27. Gworek B., Dmuchowski W., Baczewska-Dąbrowska A.H. Mercury in the terrestrial environment: a review. Environ Sci Eur. 2020. 32:128 doi.org/10.1186/s12302-020-00401-x.
28. Huhu Kang, Xiaohong Liu, Junming Guo et al. Characterization of mercury concentration from soils to needle and tree rings of Schrenk spruce (*Picea schrenkiana*) of the middle Tianshan Mountains, northwestern China. Ecological Indicators. 2019. 104. 24-31 doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.04.066.
29. Ignatavičius G., Unsal M., Busher P. et al. Geochemistry of mercury in soils and water sediments // AIMS Environmental Science, 2022, Volume 9, Issue 3: 277-297. doi: 10.3934/environsci.2022019

30. Jun Zhou, Obrist D., Dastoor A. et al. Mercury uptake by vegetation and impacts on global mercury cycling. *Nature Reviews Earth&environment*. 2021. 2. 269-284. Doi.org/10.1038/s43017-021-00146-y.
31. Lyapina E.E. Spatial distribution of mercury load on the territory of the Altai region according to the bioindication research data," *Proc. SPIE 11208, 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 112084I*. 2019. doi: 10.1117/12.2540735
32. Markert B. *Plants as biomonitors. Indicators for heavy metals in the terrestrial environment*. Weinheim: VCH, 1993, p. 644.
33. Nováková T., Navrátil T., Schütze M. et al. Reconstructing atmospheric Hg levels near the oldest chemical factory in central Europe using a tree ring archive. *Environmental Pollution*. 2022. 304. doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119215.
34. Scanlon T.M., Riscassi A.L., Demers J.D. et al. Mercury accumulation in tree rings: Observed trends in quantity and isotopic composition in Shenandoah National Park, Virginia. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2020. 125. doi.org 10.1029/2019JG005445.
35. Xu Liu, Xun Wang, Dingyong Wang Assessment of tree-ring mercury radial translocation and age effect in Masson pine: Implications for historical atmospheric mercury reconstruction. *Journal of Environmental Sciences*. 2024. 138. 266-276 doi.org/10.1016/j.jes.2022.10.02.7
36. Yusupov D.V., Lyapina E.E., Tursunaliyeva E.M., et al. Poplar tre (*Populus Balsamifera L.*) as indicator of mercury emission from a point source. *Chemosphere*. 2022. 287. 132157. doi.org: 10.1016/j.chemosphere.2021.132157.

References

1. Alekseenko V.A. *Ekologicheskaya geohimiya: Uchebnik* [Environmental geochemistry: Textbook] Moscow, M.: Logos, 2000, p. 627.
2. Anoshin G.N., Malikova I.N., Kovalev S.I. *Rtut' v okruzhayushchej srede yuga Zapadnoj Sibiri* {Mercury in the environment of the south of Western Siberia} *Himiya v interesah ustojchivogo razvitiya* = Chemistry for sustainable development. 1995. - vol.3. - No.1-2. – pp. 69-111.
3. Gorohova, A.G., Ivanov A.I., YAZynina N.A. et al. *Soderzhanie rtuti v pochvah i biologicheskikh ob"ektah prirodnyh i tekhnogennyh territorij* [Mercury content in soils and biological objects of natural and technogenic territories] *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* = Theoretical and applied ecology. 2017. No.4. pp. 100 – 105.
4. Gudaeva E.A. *Vliyanie ekologo-geograficheskikh uslovij rosta na biostojkost' i stroenie drevesiny listvennic sibirskoj*. Dis. kand. s.-h. nauk [Vliyanie ekologo-geograficheskikh uslovij rosta na biostojkost' i stroenie drevesiny listvennic sibirsk dis. kand. s.-h. nauk] Krasnoyarsk, 2004.S. 185 p.
5. Ermakov V.V. *Biogennaya migraciya i detoksikaciya rtuti* [Biogenic migration and detoxification of mercury] *Rtut' v biosfere: ekologo-geohimicheskie aspekty: materialy mezhdunarodnogo simpoziuma* [Mercury in the biosphere: ecological and geochemical aspects: materials of the international symposium] Moscow, 2010. - pp. 5-14.
6. Ilyin V.B., Syso A.I., Bidena N.L. et al. *Fonovoe kolichestvo tyazhyolyh metallov v pochvah yuga Zapadnoj Sibiri* [Background amount of heavy metals in soils of the south of Western Siberia] *Pochvovedenie – Pochvovedenie*. 2003. - No.5. - pp. 550-556.
7. Kasimov N.S. *Klarki himicheskikh elementov kak etalony sravneniya v ekogeohimii* [Clarks of chemical elements as standards of comparison in ecogeochemistry] *Vestnik moskovskogo universiteta. Ser. 5 Geografiya*. = Bulletin of Moscow University. Ser. 5 Geography. 2015. - №2. -. pp. 7–17.
8. Klyuev N.N. *Ekologicheskie itogi reformirovaniya Rossii* [Environmental results of reforming Russia] // *Vestnik Rossijskoj akademii nauk* = Bulletin of the Russian Academy of Sciences 2001. - T. 71. - No.3. - pp. 233–239.
9. Lyapina E.E., Shvorneva E.V., Voropai N.N. *Soderzhanie rtuti v hvoe Yugo-Zapadnogo Pribajkal'ya* [Mercury content in the needles of the South-Western Baikal region] *Optika atmosfery i okeana* = Optics of the atmosphere and ocean. 2018. – 31. - No.1. - pp. 69-72.

10. Lyapina E.E. *Raspredelenie form nahozhdeniya rtuti v profile tipichnyh pochv yuzhnoj Sibiri* [Distribution of forms of mercury in the profile of typical soils of southern Siberia] *Interexpo Geo-Sibir'* = Interexpo Geo-Siberia. 2021. - Т 2. - №2. - pp. 130-136.
11. Matveev S.M., Rumyantsev D.E. *Dedrohronologiya: uchebnoe posobie* [Dedrochronology: textbook] Voronezh, 2013, p. 140 "VGLTA", 2nd ed., revised and additional.
12. Mironova A.S., Rikhvanov L.P., Baranovskaya N.V. et al. *Godovye kol'ca sosny obyknovЕННОj (Pinus Sylvestris L.) – Indikator geohimicheskoy obstanovki i hronologicheskogo izmeneniya himicheskogo elementnogo sostava okruzhayushchej sredy* [Annual rings of Scots pine (Pinus Sylvestris L.) – An indicator of the geochemical situation and chronological changes in the chemical elemental composition of the environment] *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* = News of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering. 2020. Т. 331. No.1. pp. 106–116.
13. Nedoshitova A.V., Volkova M.V. *Obsuzhdenie zarubezhnogo opyta opredeleniya toksichnyh elementov v pishchevyh pro-duktah* [Discussion of foreign experience in determining toxic elements in food products] *X Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferenciya s mezhdunarod-nym uchastiem: materialy konferencii* = All-Russian scientific and practical conference with international participation: conference materials. Volume 2, Perm, 2020. - pp. 175–179.
14. Popryadukhin V.N. *Osnovnye ekologicheskie problemy Altajskogo kraja i puti ih resheniya* [The main environmental problems of the Altai Territory and ways to solve them] The role of the Altai Region in the ecological framework of the Russian Federation: a collection of abstracts of a scientific and practical conference. Barnaul, 2017. p. 6-8.
15. Rikhvanov L.P., Robertus Yu.V., Mironova A.S. et al. *Dendrogeohimicheskie osobennosti iskopaemoj listvennicy (urochishche Pazyryk) i sovremennyh listvennic Gornogo Altaya* [Dendrogeochemical features of fossil larch (Pazyryk tract) and modern larches of the Altai Mountains] News of Tomsk Polytechnic University. 2017. No. 6. pp. 108-119.
16. Robertus Yu.V., Udachkin V.N., Rikhvanov L.P. et al. *Indikaciya komponentami prirodnoj sredy transgranichnogo perenosa zagryaznyayushchih veshchestv na territoriyu Gornogo Altaya* [Indication by components of the natural environment of transboundary transport of pollutants into the territory of the Altai Mountains] *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* = News of Tomsk Polytechnic University. 2016. - Т. 327. - No.9. pp. 39–48.
17. SanPiN 1.2.3685-21. *Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya* [Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors to humans] Moscow Minyust RF, 2021, 469 p.
18. Tyukavina O.N., Evdokimov E.N. *The root system of Scots pine in the conditions of the northern taiga zone* [Kornevaya sistema sosny obyknovЕННОj v usloviyah severo-taеzhnoj zony] *Lesnoj zhurnal* = Forest Journal. 2016. - No.1. – pp. 55-65.
19. Chernenkova T.V. *Reakciya lesnoj rastitel'nosti na promyshlennoe zagryaznenie* [Reaction of forest vegetation to industrial pollution] Moscow, M: Nauka, 2002, p. 191.
20. Yanin E.P. *Rtut' v okruzhayushchej srede promyshlennogo goroda.* [Mercury in the environment of an industrial city] Moscow, 1992, p. 3-63.
21. Arun Dev Singh, Kanika, Jaspreet Kour Critical review on biogeochemical dynamics of mercury (Hg) and its abatement strategies // *Chemosphere* 319(26):137917 2023, DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.137917
22. Cataldo D.A., Wildung R.E. Soil and plant factors influencing the accumulation of heavy metals by plants // *Perspectives of Environmental Hygiene.* – 1978. – V. 27. – P. 149–159.
23. Chellman N, Csank A., Gustin M.S. et al. Comparison of co-located ice-core and tree-ring mercury records indicates potential radial translocation of mercury in whitebark pine. *Science of The Total Environment.* 743(15). 2020. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140695.

24. Clackett S.P., Porter T.J., Lehnerr I. 400-Year Record of Atmospheric Mercury from Tree-Rings in Northwestern Canada. *Environmental Science & Technology*. 2018. 52(17). 9625–9633. DOI: doi.org/10.1021/acs.est.8b01824.
25. Gacnik J., Gustin M.S. Tree rings as historical archives of atmospheric mercury: A critical review. *Science of The Total Environment*. 2023. 898(10) doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165562.
26. Gustin M.S., Dunham-Cheatham S.M., Harper J.F. et al. Investigation of the biochemical controls on mercury uptake and mobility in trees. *Science of The Total Environment* 2022. 851(1). doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158101.
27. Gworek B., Dmuchowski W., Baczewska-Dąbrowska A.H. Mercury in the terrestrial environment: a review. *Environ Sci Eur*. 2020. 32:128 doi.org/10.1186/s12302-020-00401-x.
28. Huhu Kang, Xiaohong Liu, Junming Guo et al. Characterization of mercury concentration from soils to needle and tree rings of Schrenk spruce (*Picea schrenkiana*) of the middle Tianshan Mountains, northwestern China. *Ecological Indicators*. 2019. 104. 24-31 doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.04.066.
29. Ignatavičius G., Unsal M., Busher P. et al. Geochemistry of mercury in soils and water sediments // *AIMS Environmental Science*, 2022, Volume 9, Issue 3: 277-297. doi: 10.3934/environsci.2022019
30. Jun Zhou, Obrist D., Dastoor A. et al. Mercury uptake by vegetation and impacts on global mercury cycling. *Nature Reviews Earth&environment*. 2021. 2. 269-284. doi:10.1038/s43017-021-00146-y.
31. Lyapina E.E. Spatial distribution of mercury load on the territory of the Altai region according to the bioindication research data," *Proc. SPIE 11208, 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*, 112084I. 2019. doi: 10.1117/12.2540735
32. Markert B. *Plants as biomonitors. Indicators for heavy metals in the terrestrial environment*. Weinheim: VCH, 1993, p. 644.
33. Nováková T., Navrátil T., Schütze M. et al. Reconstructing atmospheric Hg levels near the oldest chemical factory in central Europe using a tree ring archive. *Environmental Pollution*. 2022. 304. doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119215.
34. Scanlon T.M., Riscassi A.L., Demers J.D. et al. D. Mercury accumulation in tree rings: Observed trends in quantity and isotopic composition in Shenandoah National Park, Virginia. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2020. 125. doi.org 10.1029/2019JG005445.
35. Xu Liu, Xun Wang, Dingyong Wang Assessment of tree-ring mercury radial translocation and age effect in Masson pine: Implications for historical atmospheric mercury reconstruction. *Journal of Environmental Sciences*. 2024. 138. 266-276 doi.org/10.1016/j.jes.2022.10.02.7
36. Yusupov D.V., Lyapina E.E., Tursunalieva E.M., et al. Poplar tree (*Populus Balsamifera* L.) as indicator of mercury emission from a point source. *Chemosphere*. 2022. 287. 132157. doi.org: 10.1016/j.chemosphere.2021.132157.

Сведения об авторе

Ляпина Елена Евгеньевна – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории физики климатических систем ФГБОУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, пр. Академический 10/3, г. Томск, Российская Федерация, 364055; <https://orcid.org/0000-0001-6116-0567>, e-mail: eeldv@mail.ru.

Information about the author

✉ *Elena E. Lyapina* – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher at the Laboratory of Physics of Climate Systems of the Federal State Budgetary Educational Institution Institute of Monitoring of Climate and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Akademicheskyy Ave. 10/3, Tomsk, Russian Federation, 364055; <https://orcid.org/0000-0001-6116-0567>, e-mail: eeldv@mail.ru.

✉ Для контактов / Corresponding author