

УДК 550.47

DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4602

Шифр специальности ВАК: 1.6.21

Дендрогеохимия Hg по данным изучения сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) на территории Томского района

Е.Е. Ляпина^{1✉}, Л.Т.Х. Шанг², М.Г. Крачнакова²,
Н.В. Барановская², А.Н. Маркелова¹, С.Ю. Золотов¹

¹ Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Россия, г. Томск

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉ eeldv@mail.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена необходимостью эколого-геохимической оценки особенностей поступления ртути в древесину сосны для выявления факторов, определяющих аккумуляцию элемента древесиной. *Цель:* количественная оценка содержания ртути в годовых кольцах сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на территории Томского района, а также выявление геоэкологических и климатических факторов, оказывающих влияние на аккумуляцию поллютанта. *Объект:* годовые кольца сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), широко используемые в мировых научных исследованиях для получения информации о загрязнении окружающей среды химическими элементами. *Методы:* отбор проб керна сосны, высушивание образцов при комнатной температуре. Определение количества, ширины годовых колец и прироста древесины на приборе LINTAB (программное обеспечение TSAP-Win и LIGNOVISION) в Институте мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск). Определение концентраций на ртутном анализаторе РА-915+ методом атомной абсорбции (метод пиролиза) на базе Инженерной школы природных ресурсов Томского политехнического университета. Расчёт эколого-геохимических показателей: коэффициент концентрации, временно допустимая концентрация, кларк ноосферы, нормирование по В. Markert, фактор обогащения. Оценка климатического отклика накопления ртути деревьями по среднесуточным данным по метеостанции г. Томск с 1933 по 2021 гг. *Результаты.* Получены данные о валовом содержании и геохимических особенностях накопления ртути древесиной сосны обыкновенной на территории Томского района. Результаты расчетов основных геоэкологических показателей ртутной нагрузки свидетельствуют о превышении концентраций элемента относительно фона, среднего для наземных растений, а также обогащены по результатам нормирования по скандию. Выделен период повышенной концентрации ртути в древесине сосны (1941–1974 гг.) вследствие влияния промышленности города. Выявлен похожий характер аккумуляции поллютанта в интервале 1970–1986 гг. на территории исследования с превышением в 1,6–1,8 раз относительно сопредельных сред (почва, твердый осадок снега, хвоя, мхи). На накопление ртути древесиной влияет сумма осадков, как за год, так и в течение вегетационного периода и в период с положительными температурами, а также продолжительность осадков в течение года и вегетационного периода.

Ключевые слова: ртуть, древесина, сосна, дендрогеохимия, Томский район, природно-техногенные экосистемы, геоэкологические и климатические факторы

Благодарности: Исследование проведено в рамках реализации гранта Российского научного фонда (проект № 20-64-47021) <https://rscf.ru/en/project/20-64-47021/>. Обработка данных выполнена в рамках бюджетного проекта ИМКЭС СО РАН (г. Томск).

Для цитирования: Дендрогеохимия Hg по данным изучения сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) на территории Томского района / Е.Е. Ляпина, Ле Тхи Хонг Шанг, М.Г. Крачнакова, Н.В. Барановская, А.Н. Маркелова, С.Ю. Золотов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 8. – С. 125–136. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4602

UDC 550.47

DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4602

Dendrogeochemistry of Hg according to the study of Scots pine (*Pinus sylvestris*) in the Tomsk region

E.E. Lyapina^{1✉}, L.T.H. Shang², M.G. Krachnakova²,
N.V. Baranovskaya², A.N. Markelova¹, S.Yu. Zolotov¹

¹ Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russian Federation

² National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉ eeldv@mail.ru

Abstract. Relevance. The need for an ecological and geochemical assessment of the mercury intake characteristics into pine wood in order to identify the factors determining the accumulation of the element by trees. **Aim.** Quantitative evaluation of mercury content in the annual rings of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in the Tomsk region, as well as identification of geoecological and climatic factors affecting the accumulation of pollutant. **Object.** Annual rings of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) widely used in world science to obtain information about environmental pollution by chemical elements. **Methods.** Pine core sampling, samples drying at room temperature. Determination of the number, width of annual rings and growth of wood on the LINTAB device (TSAP-Win and LIGNOVISION software) at the Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS (Tomsk). Determination of concentrations on the mercury analyzer RA-915+, by atomic absorption (pyrolysis method) on the basis of the Engineering School of Natural Resources of Tomsk Polytechnic University. Calculation of ecological and geochemical indicators: concentration coefficient, temporal allowable concentration, noosphere clark, normalization according to B. Markert, enrichment factor. To assess the climatic response of mercury accumulation by trees, the average daily data for 1933–2021 from the Tomsk weather station were used. **Results.** The authors have obtained the data on the gross content and geochemical features of mercury accumulation by Scots pine wood in the territory of the Tomsk region. The results of calculations of the main geoecological indicators of the mercury load indicate an excess of element concentrations relative to the background, the average for terrestrial plants, as well as according to scandium rationing data. The paper highlights the period of increased mercury concentration in pine wood (1941–1974) as a result of the influence of the city industry. A similar pattern of pollutant accumulation for 1970–1986 was revealed in the study area, with an excess of 1.6–1.8 times relative to adjacent environments (soil, solid snow sediment, pine needles, mosses). Hg accumulation by wood is affected by the precipitation amount, both per year and during the growing season and during the period with positive temperatures, as well as the duration of precipitation during the year and the growing season.

Keywords: mercury, wood, pine, dendrogeochemistry, Tomsk district, nature-manmade ecosystem, geoecological and climatic factors

Acknowledgements: The study was carried out within the framework of the grant from the Russian Science Foundation (project no. 20-64-47021) <https://rscf.ru/en/project/20-64-47021/>. Data processing was carried out within the framework of the budget project of the IMCES SB RAS (Tomsk).

For citation: Lyapina E.E., Le Thi Hong Shang, Krachnakova M.G., Baranovskaya N.V., Markelova A.N., Zolotov S.Yu. Dendrogeochemistry of Hg according to the study of Scots pine (*Pinus Sylvestris*) in the Tomsk region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 8, pp. 125–136. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4602

Введение

Ртуть (Hg) – серебристо-белый жидкий металл первого класса опасности [1–3]. С учетом самого высокого показателя токсичности для живых организмов среди других элементов и широкого спектра проявления негативного воздействия особое значение приобретает изучение распределения данного элемента в компонентах окружающей среды. Рассматривая поступление ртути в окружающую среду, различают две основные группы источников: природные и техногенные [4]. Природные процессы определяют глобальный круговорот

ртути, локальный и региональный техногенез, ведущие к загрязнению окружающей среды [1]. По оценкам специалистов, эмиссия ртути в окружающую среду оценивается количествами от 6500 до 8200 т/год, из которых на долю естественных выбросов приходится от 4600 до 5300 т/год [5]. Несмотря на то, что объёмы поступления ртути в окружающую среду естественным путём из земной коры и глубин мирового океана превышают объёмы, производимые антропогенными источниками, её промышленная составляющая более сконцентрирована и распределена вблизи источника за-

грязнения. Высокая токсичность всех соединений этого металла определяет актуальность и необходимость изучения распределения и накопления Hg в природных компонентах окружающей среды [2, 3, 6–8]. На территории Томской области проведены исследования по изучению содержания ртути в кернах тополя (*Populus balsamifera* L.) (94 нг/г) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) (80 нг/г) [6]; твердом осадке снега (201 нг/г) [8]; листьях тополя (25 нг/г) [4], почвах (56 нг/г) [9], мхах (27–90 нг/г), лишайниках (35–337 нг/г), грибах (156–2367 нг/г) [6] и др. Эти исследования дают представление об основных антропогенных источниках поступления ртути в окружающую среду г. Томска, к которым относятся: транспорт, печное отопление, тепловые электростанции, а также цементные заводы [4, 6–8].

Наибольшую актуальность в эколого-геохимических исследованиях имеют методы, которые позволяют оценить не только фактическое накопление ртути в данный момент времени, но и установить динамику ее поступления. К таким методам относится дендрогеохимия. Дендрогеохимический метод исследования даёт возможность получить информацию о загрязнении окружающей среды металлами, радионуклидами и другими химическими элементами, а также их соединениями путем изучения особенностей строения и вещественного состава годовых колец древесных растений [7, 10–13]. Метод позволяет отследить изменения накопления ртути за достаточно большой промежуток времени. Он малотравматичен для деревьев, не требует дорогостоящего оборудования и специальных навыков [9]. Данные, полученные при помощи изучения вещественного состава древесины, позволяют выявить изменчивость годового прироста древесины, установить хронологию событий, влияющих на прирост древесных растений, воссоздать условия внешней среды, а также оценить экологическую обстановку территории исследования [12, 14–17]. Ученые широко используют метод дендрогеохронологии для получения информации о содержании химических элементов, источниках их поступления, факторах, влияющих на аккумуляцию поллютантов древесными растениями [7, 18–20]. Известен опыт применения данного метода для оценки выбросов Hg от хлорно-щелочного завода в западной Европе [21]. Л.П. Рихвановым и др. была сделана первая попытка изучения уровня накопления делящихся элементов в годовых кольцах деревьев в зоне влияния Сибирского химического комбината. При этом методом осколочной (*f*) радиографии было обнаружено присутствие изотопов ртути, которые накапливались в определенные временные интервалы и отчетливо фиксировали направление основной «розы ветров»

в районе предприятия ядерного топливного цикла [11]. Современные исследования показывают, что ежегодно образующиеся годовые кольца деревьев являются «накопителем» ртути в момент ассимиляции. Комбинация полевых исследований и исследований в лабораториях показывает, что Hg поступает в годовые кольца деревьев в основном из атмосферы, через листву/хвою ассимилируется в древесную ткань [12, 22–24]. Отдельно стоит отметить влияние природных факторов, таких как рельеф, геохимическая обстановка и климатическая характеристика района исследования [25–27].

Цель исследования – количественная оценка содержания ртути в годовых кольцах сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на территории Томского района, а также выявление геоэкологических и климатических факторов, оказывающих влияние на аккумуляцию поллютанта древесными кернами.

Материалы и методы

В ходе исследования были отобраны образцы годовых колец сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. (далее сосна). Устойчивость к воздействию неблагоприятных факторов позволяет отнести хвойные виды деревьев к наиболее подходящим в дендрогеохимических исследованиях [9]. Выбор кернов сосны в качестве индикатора обусловлен широким ареалом её распространения, что позволяет сравнить полученные результаты с данными ранее проведенных исследований [6, 7, 11]. Как правило, годовые кольца сосны представлены четко, поэтому измерение ширины колец возможно с достаточно высокой точностью.

Точки отбора проб представляют собой различные сценарии антропогенного воздействия, такие как: бытовое загрязнение, кустарные промыслы, промышленные зоны и транспортные системы города. Всего в исследовании было задействовано четыре точки отбора проб. Первые две точки: с. Пашино («Пашино») и мкр. Тимирязево («Тимирязево») испытывают минимальное влияние г. Томска согласно преобладающему многолетнему направлению ветра, т. к. расположены западнее города. Поэтому были названы условно фоновыми. Две другие точки вблизи исследовательского ядерного реактора научно-исследовательского Томского политехнического университета («Реактор») и вблизи ООО «Томскнефтехим» («Нефтехим») испытывают воздействие северного промышленного узла (СПУ) г. Томска.

Отбор проб осуществлялся в соответствии с требованиями, которые предъявляются к отбору образцов древесины в дендрохронологических и дендроклиматических исследованиях [9]. На изучаемой пробной площадке выбиралось прямоствольное дерево, внешне неповрежденное (не подвер-

гавшееся пожару, сильной ветровой и снеговой нагрузке, рубке). При этом из условий местопроизрастания желательным являлось постоянство почвенно-грунтовых условий (отсутствие процессов заболачивания, иссушения, смыва) и ровная поверхность. Керна отбирали с использованием возрастного бурава Haglof с западной или восточной стороны дерева, на высоте 1,3 м от основания ствола. С одного учетного дерева отбиралось 1–2 керна древесины. Транспортировка образцов древесины осуществлялась в твердой таре (тубусе), чтобы исключить их поломку. После взятия образцы древесины подвергались сушке до постоянной массы при комнатной температуре. Пробы отбирали в конце вегетационного периода (август 2021 г.), в сезон низкой физиологической активности дерева. Если позволяет длина бура, то дерево просверливается насквозь и за один прием берется образец по двум противоположным радиусам [9]. Извлеченные пробы помещались в бумажные пеналы с указанием номера точки, дерева и стороны света. Пробоподготовка образцов к анализу включала в себя: высушивание при комнатной температуре в бумажных пеналах, зачистку и шлифовку керна, датирование и маркировку колец, разделение керна по годичным кольцам и их измельчение.

Определение количества и ширины годовых колец в кернах сосны проводили на приборе LINTAB с помощью программного обеспечения TSAP-Win и LIGNOVISION с точностью 0,01 мм в лаборатории динамики и устойчивости экосистем Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск).

Данные по валовым концентрациям ртути в кернах сосны получены на ртутном анализаторе РА-915+ методом атомной абсорбции с помощью приставки ПИРО-915. Биологическую матрицу пробы разлагали методом пиролиза при температуре в печи 850°C. Предел обнаружения ртути 5 нг/г, точность определения 5 нг/г, концентрации элемента рассчитаны на 1 г сухого вещества [28]. Аналитические исследования проводили в учебно-научной лаборатории на базе Инженерной школы природных ресурсов НИ ТПУ. Всего было проанализировано 337 проб.

Методика обработки результатов включала расчет эколого-геохимических показателей:

- K_c – коэффициент концентрации относительно фона:

$$K_c = C_{Hg} / C_{ф},$$

где C_{Hg} – концентрация Hg в пробе, нг/г; $C_{ф}$ – фоновая концентрация Hg, нг/г (8,4 нг/г) [25];

- ВДК (TPC – temporarily permissible concentration) – временно допустимая концентрация:

$$ВДК = C_{Hg} / 2C_{ф},$$

где C_{Hg} – концентрация Hg в пробе, нг/г; $C_{ф}$ – фоновая концентрация Hg, нг/г (8,4 нг/г) [25];

- K_N – кларк ноосферы:

$$K_N = C_{Hg} / K_{NHg},$$

где C_{Hg} – концентрация Hg в пробе, нг/г; K_{NHg} – кларк Hg в ноосфере (180 нг/г) [29];

- K_{LM} – коэффициент концентрации относительно среднего для живого вещества:

$$K_{LM} = C_{Hg} / C_{LMHg},$$

где C_{Hg} – концентрация Hg в пробе, нг/г; C_{LMHg} – среднее содержание Hg в живом веществе, нг/г (50 нг/г) [30];

- K_{LP} – коэффициент концентрации относительно среднего для наземных растений:

$$K_{LP} = C_{Hg} / C_{LPHg},$$

где C_{Hg} – концентрация Hg в пробе, нг/г; C_{LPHg} – среднее содержание Hg в наземных растениях, нг/г (15 нг/г) [7];

- K_M – коэффициент концентрации относительно В. Markert [31]:

$$K_M = C_{Hg} / C_{MHg},$$

где C_{Hg} – концентрация Hg в пробе, нг/г; C_{MHg} – содержание Hg в сухом веществе растений по В. Markert (100 нг/г) [31];

- Fe – фактор обогащения (нормирование по Sc):

$$Fe = (C_{Hg} / K_{Hg}) / (C_{Sc} / K_{Sc}),$$

где C_{Hg} – концентрация Hg в пробе, нг/г; K_{Hg} – кларк Hg сухом веществе растений (100 нг/г, по Markert) [31]; C_{Sc} – концентрация Sc в пробе, мг/кг [7]; K_{Sc} – содержание Sc (0,02 мг/кг по Markert) [31].

Для оценки климатического отклика накопления ртути деревьями использовали среднесуточные данные по метеостанции г. Томска в период с 1933 по 2021 гг. (89 лет). Оценивали связь накопления ртути древесными кернами с температурой воздуха, количеством и продолжительностью осадков, направлением ветра в течение года, вегетационного периода, при положительных и отрицательных температурах.

Статистическая обработка результатов исследования проводилась с использованием пакета STATISTICA 6.1.

Результаты и обсуждение

Распределение содержания ртути в кернах сосны на территории опробования носит неравномерный характер, что подтверждается результатами расчета коэффициента вариации (C_v 104–222%) (табл. 1).

Средние концентрации ртути в кернах сосны изученных деревьев варьируют в пределах 3–99 нг/г.

Наименьшее содержание Hg отмечается в точке «Реактор», наибольшее – в точках «Нефтехим» и «Тимирязево» (в пределах ошибки измерений). В кернах исследованных деревьев содержание Hg превышает концентрации элемента, отмеченные в ранее проведенных на территории исследованиях [6, 7], за исключением точки «Реактор». Следует отметить, что территориально поступление Hg в керн сосны значимо не различается в зависимости от расположения по отношению к городу с учетом преобладающего направления ветра. Исключение составляют данные в точке «Реактор».

Таблица 1. Статистические параметры содержания ртути в кернах *Pinus sylvestris* L. на территории Томского района (без ураганных значений)

Table 1. Statistical parameters of mercury concentration in *Pinus sylvestris* L. cores on the territory of the Tomsk district (without hurricane values)

Точка Point	Возраст, лет Age, years	Концентрация Hg, нг/г Hg concentration, ng/g			Медиана Median	Стандартное отклонение Standard deviation	Коэффициент вариации Coefficient of variation
		среднее average	min	max			
Пашино Pashino	80	86,3±21,6	5	1088	17,7	191,6	222
Тимирязево Timiryazovo	79	98,6±21,6		635	45,3	141,0	143
Реактор Reactor	89	33,8±3,8		137	24,8	35,1	104
Нефтехим Neftekhim	81	99,8±19,7		982	29	176,4	177

Интересно отметить синхронность хронологии поступления Hg во всех точках опробования (рис. 1), также за исключением точки «Реактор». Кратность превышения среднего значения в период с 1941 по 1974 гг. в точках «Пашино», «Тимирязево» и «Нефтехим» составляет 15,5; 7 и 5,1, соответственно. Для иллюстрации полученных периодов повышенных концентраций ртути в кернах сосны были построены столбчатые диаграммы, демонстрирующие два периода со значимо отличающимися средними содержаниями Hg в кернах всех исследованных деревьев (рис. 2). Резкий рост содержания ртути в древесине с 1941 г. объясняется эвакуацией около 30 промышленных предприятий в период Великой отечественной войны (1941–1945 гг.) из европейской части России в г. Томск. Среди них – ярославский «Электромашиностроительный завод»; московские заводы: «Манометр», «Первый подшипниковый завод», «Электропровод», «Мос-

кабель», «Электроламповый завод», «Красный богатырь»; ленинградские заводы: «Радист» и «Электросила» и др. [32].

В точке «Реактор» выделили два периода повышенных концентраций элемента: 1936–1966 гг. ($61,6 \pm 7$ нг/г) и 1995–2007 гг. ($44,3 \pm 11,8$ нг/г). Между ними с 1970 по 1994 гг. «перешеек» с минимальным содержанием поллютанта – $9,7 \pm 1,8$ нг/г. Кратность превышения в периоды повышенных концентраций ртути составляет 6,3 и 1,4, соответственно. В период максимального среднего содержания (1936–1966 гг.) на территории г. Томска начинают производственную деятельность карандашная, обувная, табачная фабрики и химзавод. С начала 50-х гг. XX в. отмечается рост строительства государственного жилья. До 1961 г. существовала Томская железная дорога [32].

Динамика накопления ртути в древесине всех исследованных деревьев свидетельствует о снижении поступления поллютанта от 1933 к 2021 гг., что подтверждают графики линейных трендов (рис. 1).

Общим характером аккумуляции ртути кернами *Pinus sylvestris* L. отмечаются точки «Пашино»–«Тимирязево» ($r = 0,32$ при $P=0,05$) и «Тимирязево»–«Реактор» ($r = 0,22$ при $P=0,05$). Статистическая значимость полученных оценок определялась с помощью двустороннего t-критерия нулевой гипотезы, при определении доверительных интервалов коэффициентов корреляции использовался уровень значимости 0,05. Критическое значение коэффициента корреляции для выборки 80 лет составляет 0,22 при $P=0,05$. Влияния накопления ртути на ширину годичных колец всех исследованных деревьев выявлено не было.

По данным расчета геоэкологических показателей (табл. 2) были выявлены превышения содержания ртути относительно фона и, как следствие, расчетного параметра ВДК, среднего для живого вещества и наземных растений, за исключением точки «Реактор». Данные расчетов также подтверждают обогащение кернов элементом по результатам расчёта Fe (нормирования по скандию). Нормирование по В. Market (1991) показывает отсутствие накопления поллютанта деревьями всех исследованных точек. Полученные содержания также ниже кларка ноосферы.

Сравнивая валовое содержание ртути в древесине сосны Томского района с концентрациями в сопредельных средах (рис. 3), следует отметить превышение по всем представленным на рисунке средам в: почвы 1,2–2,7; твердый осадок снега 1,6–1,8; хвоя 6,1–13,3; мхи 1,2–2,5; грибы 1,1–1,2; древесина сосны 1,6–1,8; древесина тополя 1,4–1,6 раз, за исключением эпифитных видов лишайников [6].

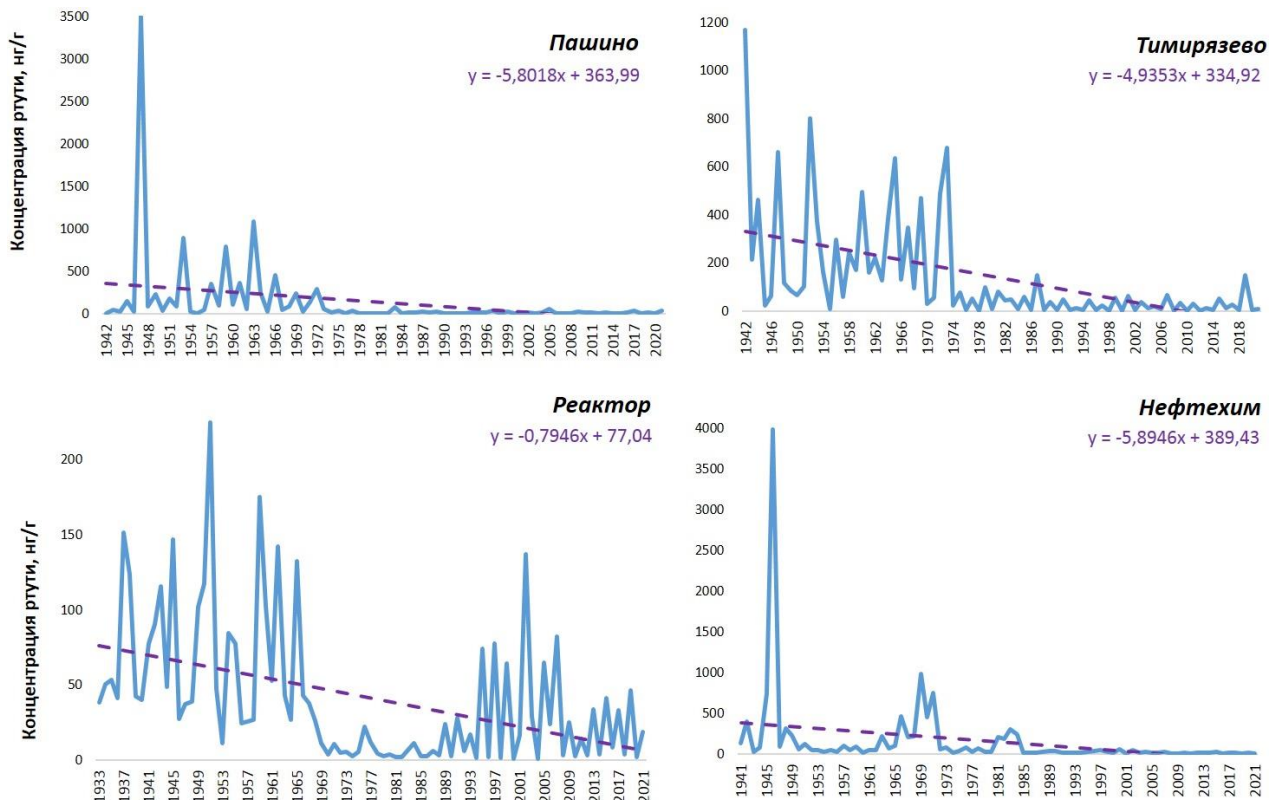


Рис. 1. Динамика поступления Hg в керн *Pinus sylvestris* L. на территории Томского района
Fig. 1. Dynamics of Hg entry into Scots pine core in the Tomsk region

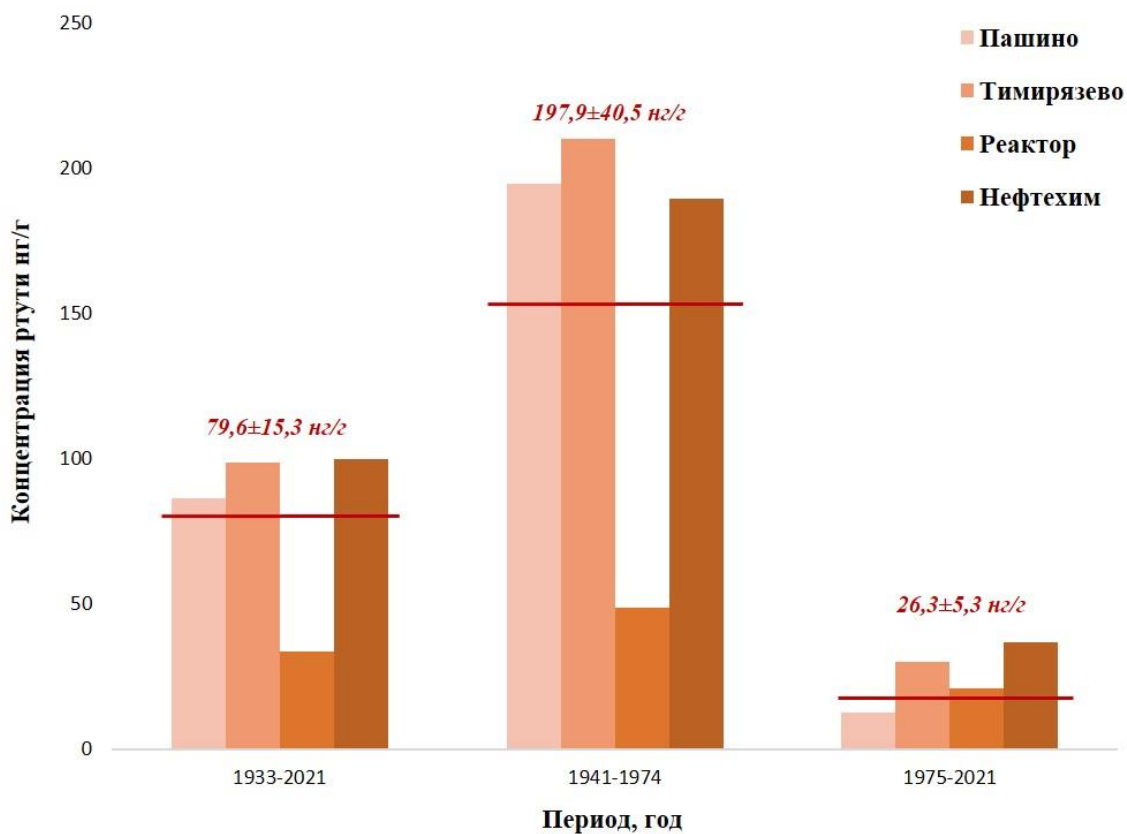


Рис. 2. Периоды аккумуляции ртути кернами *Pinus sylvestris* L. на территории Томского района
Fig. 2. Periods of mercury accumulation in *Pinus sylvestris* L. cores in the Tomsk region

Таблица 2. Геоэкологические показатели ртутной нагрузки на территорию Томского района по данным изучения керна *Pinus sylvestris* L. в период с 1941 по 2021 гг. (без ураганных значений)

Table 2. Geoeological indicators of mercury load on the territory of the Tomsk region according to the study of *Pinus sylvestris* L. in the period from 1941 to 2021 (without hurricane values)

Точки Points	Kc	ВДК TPC	K _N	K _{LM}	K _{LP}	K _M	Fe
Пашино Pashino	9,1	4,6	0,5	1,7	5,6	0,8	4,2
Тимирязево Timiryazovo	10,0	5,0	0,4	1,5	5,1	0,8	3,8
Реактор Reactor	3,8	1,9	0,2	0,6	2,1	0,3	1,6
Нефтехим Neftekhim	10,7	5,3	0,5	1,8	6,0	0,9	4,5

Примечание: раздел материалы и методы.
Note: section materials and methods.

В точке «Реактор» среднее содержание ртути в древесине ниже такового в твердом осадке снега [8], древесине тополя и сосны [6] на территории г. Томска и Томского района. Кроме того, выявлен похожий характер в аккумуляции поллютанта древесиной сосны в точках «Реактор» и «Яр» ($r = -0,56$; $P = 0,05$) в период 1970–1984 гг., а также «Самусь» в период 1971–1986 гг. ($r = 0,4$; $P = 0,05$). Критическое значение коэффициента корреляции для выборок 25 («Яр») и 16 лет («Самусь») составляет 0,5 и 0,4 при $P = 0,05$, соответственно.

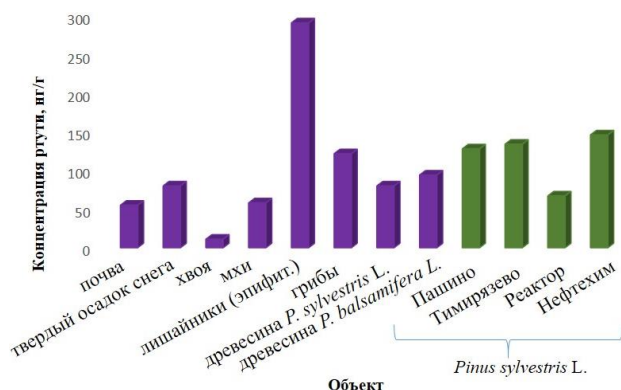


Рис. 3. Содержание ртути в объектах окружающей среды на территории Томского района [5, 6, 9, 26]

Fig. 3. Mercury content in environmental objects in the Tomsk region [5, 6, 9, 26]

В результате проведенного корреляционного анализа линейная зависимость выявлена между количеством осадков при отрицательных температурах и содержанием ртути в годовых кольцах сосны во всех точках исследования. Преобладающими ветрами в течение всего года, оказывающими воздействие на поступление ртути в керны сосны на

территории исследования, являются северо-восточные и юго-западные ($r = 0,22$ при $P = 0,05$). Юго-западные ветра также значимы в течение вегетационного периода, при положительных и отрицательных температурах ($r = 0,22$ при $P = 0,05$).

Для подтверждения влияния метеопараметров на поступление элемента в древесину применили кластерный анализ и построили дендрограмму корреляционной матрицы концентрации Hg и метеопараметров (рис. 4). Анализ дендрограммы показывает, что в первую очередь на поступление элемента в древесину сосны влияет сумма осадков, как за год, так и в течение вегетационного периода и в период с положительными температурами. Кроме того, важным является количество дней с осадками в течение года и за вегетационный период. Влияние на вегетацию оказывает накопленный в течение зимнего периода снег. Количество дней с температурами $>0^{\circ}\text{C}$ и сумма температур за этот период также важны при исследовании поступления ртути в деревья.

Результаты факторного анализа подтверждают полученные ранее зависимости. Выделяются два основных фактора, суммарное воздействие которых составляет 52,1%. «Фактор 1» (32,3%) указывает, что главными метеопараметрами, влияющими на накопление Hg в древесине, являются осадки при температуре $>0^{\circ}\text{C}$ и продолжительность данного периода. Следующий по значимости «Фактор 2» (19,8%), который выделил осадки, как в течение календарного года, так и за зимний период, в том числе и предыдущего года. Все зависимости характеризуются положительным знаком.

То есть с повышением температуры и увеличением количества осадков содержание ртути в древесине сосны возрастает. Полученные закономерности согласуются с данными, приведенными для хвои сосны [6] на территории Томской области и Сибирского региона в целом [26]. При повышении температуры воздуха пары ртути с подстилающей поверхности становятся более активными наряду с биологическими и биохимическими реакциями окружающей среды, которые способствуют биохимической кинетике растения, что подтверждает способность накапливать элемент растениями [17, 27].

В период с 1933 по 2021 гг. наблюдается повышение температуры, как за год, так и в течение вегетационного периода. Увеличивается не только температура воздуха, но и продолжительность периода с положительными температурами. Количество осадков наоборот снижается. Отдельно стоит отметить, что во временном интервале с повышенными концентрациями ртути в древесных кернах (1941–1974 гг.) отмечается наибольшая сумма осадков в течение как вегетационного периода, так и за год. Данная тенденция отображена в расчетах, представленных на рис. 4.

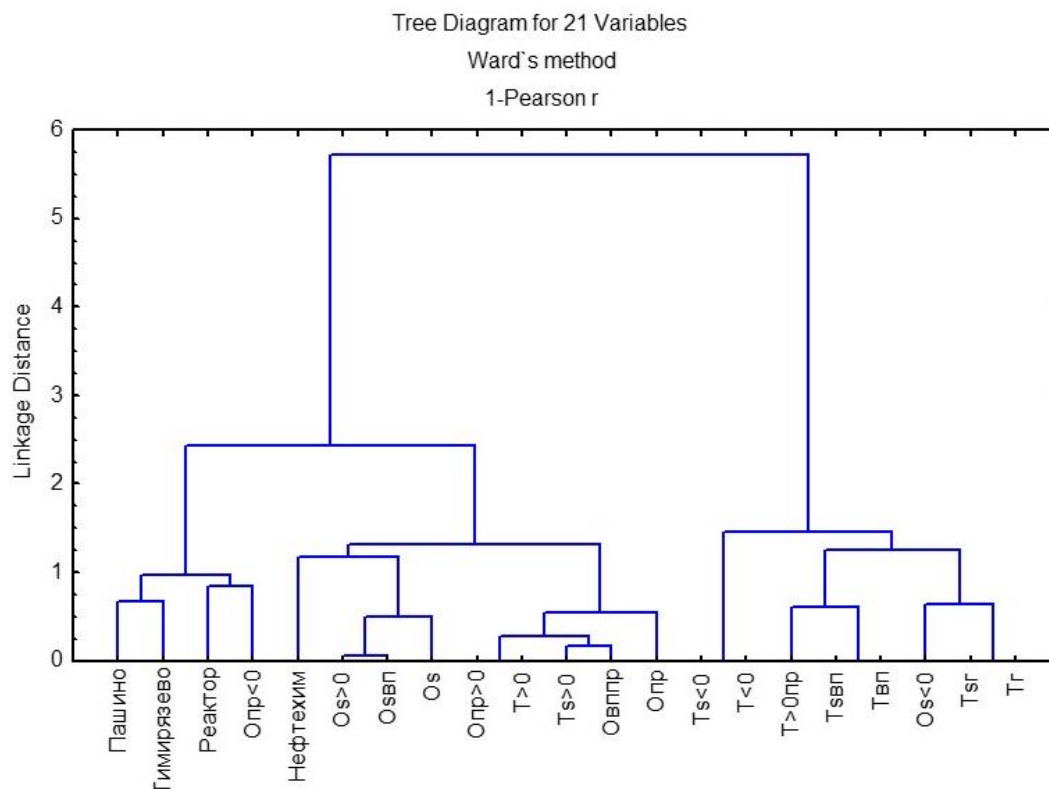


Рис. 4. Дендрограмма корреляционной матрицы влияния климатических параметров на поступление ртути в годовые кольца *Pinus sylvestris* L. на территории Томского района (1-Pearson $r=0,21$), показатели: Температура: Тг – среднегодовая; Тsг – сумма за год; Твп – за вегетационный период; Тсвп – сумма за вегетационный период; Т>0; Т>0s – сумма положительных температур; Т>0пр – продолжительность периода с положительными температурами; Т<0; Т<0s – сумма отрицательных температур; Осадки: Оsг – сумма за год; Опр – количество дней с осадками в течение года; Оsвп – сумма за вегетационный период; О>0s – сумма при положительных температурах; О<0s – сумма при отрицательных температурах; О>0пр – количество дней с осадками при положительных температурах; О<0пр – количество дней с осадками при отрицательных температурах

Fig. 4. Dendrogram of the correlation matrix of the affect of climatic parameters on mercury flow into the annual rings of *Pinus sylvestris* L. in the Tomsk region, indicators: Temperature: Тг – average annual; Тsг – amount for the year; Твп – during the growing (vegetative) season; Тсвп – amount for the growing season; Т>0; Т>0s – sum of positive temperatures; Т>0пр – duration of the period with positive temperatures; Т<0; Т<0s – sum of negative temperatures; Precipitation: Оsг – amount for the year; Опр – number of days with precipitation during the year; Оsвп – amount for the growing season; О>0s – sum at positive temperatures; О<0s – sum at negative temperatures; О>0пр – number of days with precipitation at positive temperatures; О<0пр – number of days with precipitation at subzero temperatures

Результаты расчета корреляционного анализа выявили влияние на аккумуляцию ртути северо-восточных и юго-западных ветров в течение года. Юго-западные ветра играют важную роль в поступлении элемента в течение вегетационного периода, при положительных температурах и в течение зимнего периода. Кластерный анализ подтвердил преобладающую роль в атмосферном переносе ртути южного, восточного и западного ветров за год, в течение вегетационного периода, при положительных и отрицательных температурах, а также их продолжительность. Что совпадает с долей ветров этих направлений, о чем свидетельствует роза ветров как за весь период исследования, так и в периоды повышенных концентраций (рис. 5).

Заключение

Средние содержания Hg в кернах сосны превышают ранее полученные концентрации для Томского района. Кроме того, результаты расчетов геоэкологических параметров свидетельствуют об обогащении элементом древесины сосны на территории Томского района по сравнению с фоном, средним для наземных растений, а также по данным нормирования по скандию.

Следует отметить синхронность поступления поллютанта в древесину на территории Томского района. Выделен период повышенных концентраций ртути с 1941 по 1974 гг. в древесине сосны трёх деревьев из четырех. Возможно, это связано с эвакуацией промышленных предприятий в годы Великой отечественной войны.

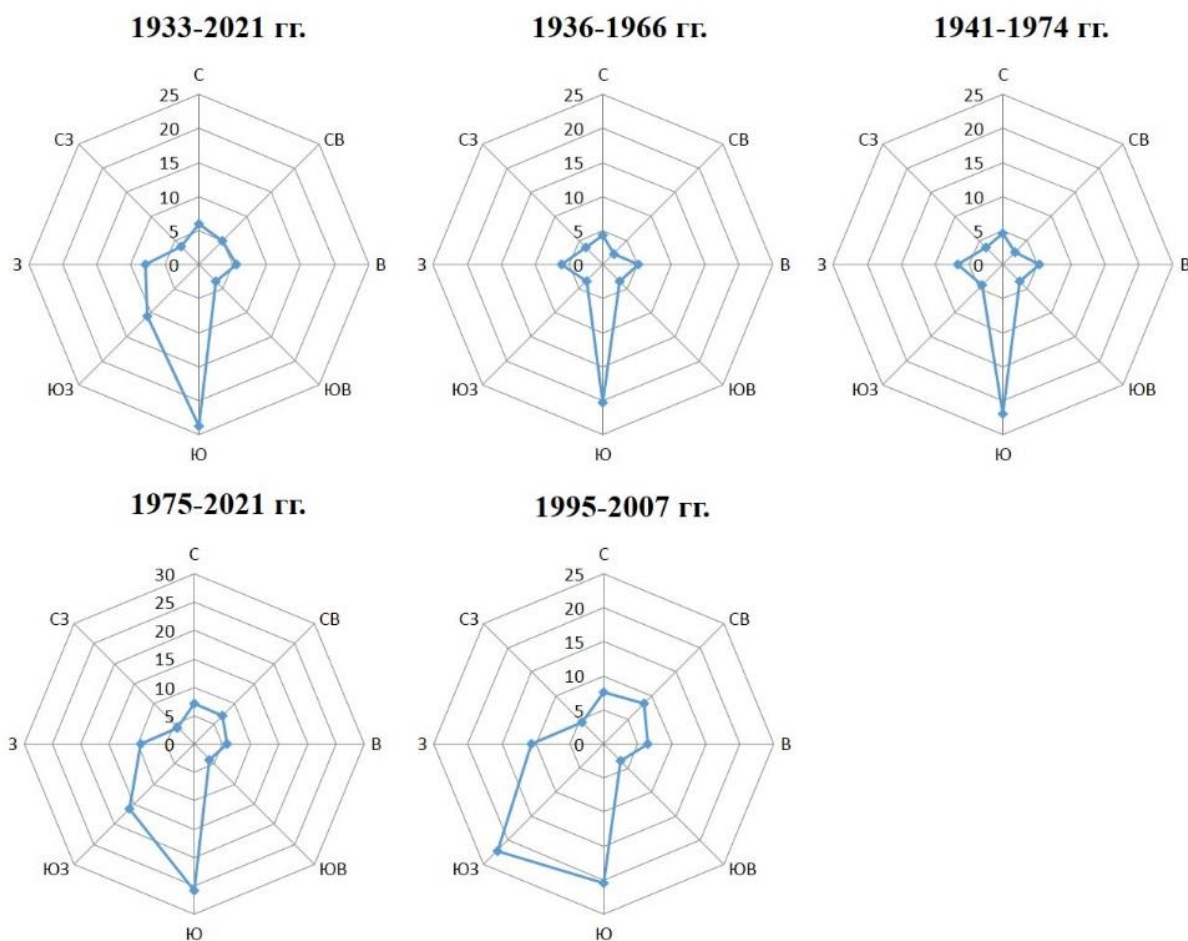


Рис. 5. Роза ветров по данным метеостанции г. Томска
Fig. 5. Wind rose according to the weather station in Tomsk

В точках «Реактор», «Яр» и «Самусь» в период 1970–1984 гг. выявлен похожий характер аккумуляции поллютанта. Однако средние содержания ртути превышают ранее полученные в 1,6–1,8 раз. Общим характером накопления ртути древесиной *Pinus sylvestris* L. отмечаются точки «Пашино», «Тимирязево» и «Реактор».

Основными метеопараметрами, влияющими на накопление Hg древесиной, определены сумма

осадков как за год, так и в течение вегетационного периода и в период с положительными температурами. Кроме того, важным является количество дней с осадками в течение года и за вегетационный период. Вегетация нового года зависит от влаги, накопленной в предыдущий зимний период. Количество дней с температурами $>0^{\circ}\text{C}$ и сумма температур за этот период также важны при исследовании поступления ртути в деревья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Касимов Н.С., Башкин В.Н. Биогеохимия. – М.: Научный мир, 2004. – 647 с.
2. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов. – М: Экология, 1997. – 576 с.
3. Ковальский В.В. Геохимическая экология. – М.: Наука, 1974. – 299 с.
4. Ртуть в листьях тополя на урбанизированных территориях Юга Сибири и Дальнего Востока / Д.В. Юсупов, Л.П. Рихванов, Ю.В. Робертус, Е.Е. Ляпина, Е.М. Турсуналиева, Н.В. Барановская, Н.А. Осипова // Экология и промышленность России. – 2018. – Т. 22. – № 12. – С. 56–62. DOI: 10.18412/1816-0395-2018-12-56-62.
5. Ракитский В.Н., Синицкая Т.А., Скупневский С.В. Современные проблемы загрязнения ртутью окружающей среды (обзор литературы) / Гигиена и санитария. – 2020. – № 5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennyye-problemy-zagryazneniya-rtutyu-okruzhayushey-sredy-obzor-literatury> (дата обращения: 22.10.2023).
6. Ляпина Е.Е. Экогеохимия ртути в природных средах Томского региона: дис. ...канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2012. – 154 с.
7. 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,

- А.Ф. Судыко // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 4. – С. 106–116. DOI: 10.18799/24131830/2020/1/2452.
8. Таловская А.В. Экогеохимия атмосферных аэрозолей на урбанизированных территориях юга Сибири: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Томск, 2022. – 170 с.
9. Матвеев С.М., Румянцев Д.Е. Дендрохронология. – Воронеж: ВГЛТА, 2013. – 140 с.
10. Ляпина Е.Е. Мониторинг техногенной трансформации городских почв (на примере г. Томска) // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. – 2020. – Т. 1. – № 5. – С. 154–160. DOI: 10.23885/2500-395X-2020-1-5-154-160.
11. Рихванов Л.П., Архангельская Т.А., Замятина Ю.Л. Дендрорадиография как метод ретроспективной оценки радиоэкологической ситуации: монография. – Томск: Дельтаплан, 2015. – 148 с.
12. Comparison of co-located ice-core and tree-ring mercury records indicates potential radial translocation of mercury in whitebark pine / N. Chellman, A. Csank, M.S. Gustin, M.M. Arienzo, M.V. Estrada, J.R. McConnel // *Science of The Total Environment*. – 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140695.
13. Clackett S.P., Porter T.J., Lehnerr I. 400-year record of atmospheric mercury from tree-rings in Northwestern Canada // *Environmental Science&Technology*. – 2018. DOI: 10.1021/acs.est.8b01824.
14. Gacnik J., Gustin M.S. Tree rings as historical archives of atmospheric mercury: a critical review // *Science of The Total Environment*. – 2023. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.165562.
15. Investigation of the biochemical controls on mercury uptake and mobility in trees / M.S. Gustin, S.M. Dunham-Cheatham, J.F. Harper, Cho Won-Gyu, J.D. Blum, M.W. Johnson // *Science of The Total Environment*. – 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.158101.
16. Mercury accumulation in tree rings: observed trends in quantity and isotopic composition in Shenandoah National Park, Virginia / T.M. Scanlon, A.L. Riscassi, J.D. Demers, T.D. Camper, T.R. Lee, D.L. Druckenbrod // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. – 2020. DOI: 10.1029/2019JG005445.
17. 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. DOI: 10.1016/j.jes.2022.10.027.
18. Gworek B., Dmuchowski W., Baczewska-Dąbrowska A.H. Mercury in the terrestrial environment: a review // *Environmental Science Europe*. – 2020. DOI: 10.1186/s12302-020-00401-x.
19. Characterization of mercury concentration from soils to needle and tree rings of Schrenk spruce (*Picea schrenkiana*) of the middle Tianshan Mountains, northwestern China / Huhu Kang, Xiaohong Liu, Junming Guo, Bo Wang, Guobao Xu, Guoju Wu, Shichang Kang, Jie Huang // *Ecological Indicators*. – 2019. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.04.066.
20. Reconstructing atmospheric Hg levels near the oldest chemical factory in central Europe using a tree ring archive / T. Nováková, T. Navrátil, M. Schütze, J. Rohovec, Š. Matoušková, M. Hošek, T.M. Grygar // *Environmental Pollution*. – 2022. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.119215.
21. Dendrochemical assessment of mercury releases from a pond and dredged sediment landfill impacted by a chlor-alkali plant / F. Maillard, O. Girardclos, M. Assad, C. Zappellini, J.M. Pérez Mena, L. Yung, C. Guyeux, S. Chrétien, G. Bigham, C. Cosio, M. Chalot // *Environmental Research*. – 2016. – P. 122–126. DOI: 10.1016/j.envres.2016.03.034.
22. Critical review on biogeochemical dynamics of mercury (Hg) and its abatement strategies/ Arun Dev Singh, Kanika, Jaspreet Kour // *Chemosphere*. – 2023. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.137917.
23. Янин Е.П. Ртуть в окружающей среде промышленного города. – М.: ИМГРЭ, 1992. – 169 с.
24. Mercury uptake by vegetation and impacts on global mercury cycling / Jun Zhou, D. Obrist, A. Dastoor, M. Jiskra, A. Ryjkov // *Nature Reviews Earth&environment*. – 2021. – P. 269–284. DOI: 10.1038/s43017-021-00146-y.
25. Содержание ртути в почвах и биологических объектах природных и техногенных территорий / А.Г. Горохова, А.И. Иванов, Н.А. Язынина, С.Е. Ермолаев, М.В. Фerezанова // *Теоретическая и прикладная экология*. – 2017. – № 4. – С. 100–105.
26. Ляпина Е.Е., Шворнева Е.В., Воронин Н.Н. Содержание ртути в хвое Юго-Западного Прибайкалья // *Оптика атмосферы и океана*. – 2018. – № 1. – С. 69–72. DOI: 10.15372/AOO20180111.
27. Lyapina E.E., Perehudina E.V. Mercury pressure in the Tomsk region based on biomonitoring studies // *Limnology and Freshwater Biology*. – 2022. – P. 1292–1294. DOI: 10.31951/2658-3518-2022-A-3-1292.
28. Mashyanov N., Pogarev S., Ryzhov V. Mercury thermo-speciation in contaminated soils and sediments // *RMZ: Materials and Geoenvironment*. – 2004. – P. 1980–1983. DOI: 10.1007/s00128-021-03159-x.
29. Глазовская М.А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР. – М.: Высшая школа, 1988. – 327 с.
30. Виноградов А.П. Проблемы геохимии и космохимии. Избранные труды. – М.: Наука, 1988. – 336 с.
31. Markert B. Plants as biomonitors. Indicators for heavy metals in the terrestrial environment. – Weinheim: VCH, 1993. – 644 p.
32. Томская область в предвоенные, военные годы и послевоенное восстановление: Юб. стат. сб./Томскстат – Томск, 2020. – 105 с.

Информация об авторах

Елена Евгеньевна Ляпина, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории физики климатических систем Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3. eeldv@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6116-0567>

Ле Тхи Хонг Шанг, аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. thihongshang1@tpu.ru; <https://orcid.org/0009-0004-6708-8825>

Мария Германовна Крачнакова, студент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. mgk8@tpu.ru; <https://orcid.org/0009-0006-0848-0645>

Наталья Владимировна Барановская, доктор биологических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. natalya.baranovs@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3729-800X>

Анна Николаевна Маркелова, младший научный сотрудник лаборатории биоинформационных технологий Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3. maranna.levoka@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7462-2660>

Сергей Юрьевич Золотов, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории физики климатических систем Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3. zolotov@asu.tusur.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5120-8985>

Поступила в редакцию: 29.02.2024

Поступила после рецензирования: 03.04.2024

Принята к публикации: 16.05.2024

REFERENCES

1. Kasimov N.S., Bashkin V.N. *Biogeochemistry*. Moscow, Nauchny mir Publ., 2004. (In Russ.)
2. Ivanov V.V. *Ecological geochemistry of elements*. Moscow, Ekologiya Publ., 1997. 576 p. (In Russ.)
3. Kovalskiy V.V. *Geochemical ecology*. Moscow, Nauka Publ., 1974. 300 p. (In Russ.)
4. Yusupov D.V., Rikhvanov L.P., Robertus Yu.V., Lyapina E.E., Tursunaliyeva E.M., Baranovskaya N.V., Osipova N.A. Mercury in poplar leaves in urbanized areas of Southern Siberia and the Far East. *Ecology and industry of Russia*, 2018, vol. 22, no. 12, pp. 56–62. (In Russ.) DOI: 10.18412/1816-0395-2018-12-56-62.
5. Rakitskiy V.N., Sinitskaya T.A., Skupnevsky S.V. Modern problems of mercury pollution of the environment (literature review). *Hygiene and sanitation*, 2020. (In Russ.) Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-problemy-zagryazneniya-tutuyu-okruzhayushchey-sredy-obzor-literatury> (accessed 22 October 2023).
6. Lyapina E.E. *Ecogeochemistry of mercury in natural environments of the Tomsk region*. Cand. Dis. Tomsk, 2012. 154 p. (In Russ.)
7. Mironova A.S., Rikhvanov L.P., Baranovskaya N.V., Sudyko A.F. 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. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 1, pp. 106–116. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2020/1/2452.
8. Talovskaya A.V. *Ecogeochemistry of atmospheric aerosols in urbanized territories of southern Siberia*. Cand. Dis. Tomsk, 2022. 170 p. (In Russ.)
9. Lyapina E.E. Monitoring of technogenic transformation of urban soils (on the example of Tomsk). *Ecology. Economy. Computer science. Series: System analysis and modeling of economic and ecological systems*, 2020, vol. 1, no. 5, pp. 154–160. (In Russ.) DOI: 10.23885/2500-395X-2020-1-5-154-160.
10. Matveev S.M., Rummyantsev D.E. *Dendrochronology*. Voronezh, VGLTA Publ., 2013. 140 p. (In Russ.)
11. Rikhvanov L.P., Arkhangelskaya T.A., Zamyatina Y.L. *Dendroradiography as a method of retrospective assessment of the radioecological situation: monograph*. Tomsk, Deltaplan Publ., 2015. 148 p. (In Russ.)
12. Chellman N., Csank A., Gustin M.S., Arienzo M.M., Estrada M.V., McConnel J.R. 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*, 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140695.
13. Clackett S.P., Porter T.J., Lehnher I. 400-year record of atmospheric mercury from tree-rings in Northwestern Canada. *Environmental Science&Technology*, 2018. DOI: 10.1021/acs.est.8b01824.
14. Gacnik J., Gustin M.S. Tree rings as historical archives of atmospheric mercury: a critical review. *Science of The Total Environment*, 2023. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.165562.
15. Gustin M.S., Dunham-Cheatham S.M., Harper J.F., Cho Won-Gyu, Blum J.D., Johnson M.W. Investigation of the biochemical controls on mercury uptake and mobility in trees. *Science of The Total Environment*, 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.158101.
16. Scanlon T.M., Riscassi A.L., Demers J.D., Camper T.D., Lee T.R., Druckenbrod D.L. Mercury accumulation in tree rings: observed trends in quantity and isotopic composition in Shenandoah National Park, Virginia. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2020. DOI: 10.1029/2019JG005445.
17. 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. DOI: 10.1016/j.jes.2022.10.027.
18. Gworek B., Dmuchowski W., Baczewska-Dąbrowska A.H. Mercury in the terrestrial environment: a review. *Environ Sci Eur*, 2020. DOI: 10.1186/s12302-020-00401-x.
19. Huhu Kang, Xiaohong Liu, Junming Guo, Bo Wang, Guobao Xu, Guoju Wu, Shichang Kang, Jie Huang. 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. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.04.066.

20. Nováková T., Navrátil T., Schütze M., Rohovec J., Matoušková Š., Hošek M., Grygar T.M. Reconstructing atmospheric Hg levels near the oldest chemical factory in central Europe using a tree ring archive. *Environmental Pollution*, 2022. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.119215.
21. Maillard F., Girardclos O., Assad M., Zappellini C., Pérez Mena J.M., Yung L., Guyeux C., Chrétien S., Bigham G., Cosio C., Chalot M. Dendrochemical assessment of mercury releases from a pond and dredged sediment landfill impacted by a chlor-alkali plant. *Environmental Research*, 2016, pp. 122–126. DOI: 10.1016/j.envres.2016.03.034.
22. Arun Dev Singh, Kanika, Jaspreet Kour. Critical review on biogeochemical dynamics of mercury (Hg) and its abatement strategies. *Chemosphere*, 2023. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.137917
23. Yanin E.P. *Mercury in the environment of an industrial city*. Moscow, IMGRE Publ., 1992. 169 p. (In Russ.)
24. Jun Zhou, Obrist D., Dastoor A., Jiskra M., Ryjgov A. Mercury uptake by vegetation and impacts on global mercury cycling. *Nature Reviews Earth&environment*, 2021. DOI: 10.1038/s43017-021-00146-y.
25. Gorokhova A.G., Ivanov A.I., Yazinina N.A., Ermolaev S.E., Ferezanova M.V. Mercury content in soils and biological objects of natural and man-made territories. *Theoretical and Applied Ecology*, 2017, no. 4, pp. 100–105. (In Russ.)
26. Lyapina E.E., Shvorneva E.V., Voropai N.N. Mercury content in conifers of the Southwestern Baikal region. *Optics of the atmosphere and ocean*, 2018, no. 1, pp. 69–72. (In Russ.) DOI: 10.15372/AOO20180111.
27. Lyapina E.E., Perehudina E.V. Mercury pressure in the Tomsk region based on biomonitoring studies. *Limnology and Freshwater Biology*, 2022, pp. 1292–1294. DOI: 10.31951/2658-3518-2022-A-3-1292.
28. Mashyanov N., Pogarev S., Ryzhov V. Mercury thermo-speciation in contaminated soils and sediments. *RMZ: Materials and Geoenvironment*, 2004, pp. 1980–1983. DOI: 10.1007/s00128-021-03159-x.
29. Glazovskaya M.A. *Geochemistry of natural and man-made landscapes of the USSR*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988. 327 p. (In Russ.)
30. Vinogradov A.P. *Problems of geochemistry and cosmochemistry. Selected works*. Moscow, Nauka Publ., 1988. 336 p. (In Russ.)
31. Markert B. *Plants as biomonitors. Indicators for heavy metals in the terrestrial environment*. Weinheim, VCH, 1993. 644 p.
32. *Tomsk region in the pre-war, war years and post-war reconstruction*. Anniversary statistical release/Tomskstat. Tomsk, 2020. 105 p. (In Russ.)

Information about the authors

Elena E. Lyapina, Cand. Sc., Senior Researcher, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, 10/3, Akademicheskij avenue, Tomsk, 634055, Russian Federation. eeldv@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6116-0567>

Le Thi Hong Shang, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. thihongshang1@tpu.ru; <https://orcid.org/0009-0004-6708-8825>

Maria G. Krachnakova, Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. mgk8@tpu.ru; <https://orcid.org/0009-0006-0848-0645>

Natalia V. Baranovskaya, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. natalya.baranovs@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3729-800X>

Anna N. Markelova, Junior Researcher, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, 10/3, Akademicheskij avenue, Tomsk, 634055, Russian Federation. maranna.levoka@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-74622660>

Sergey Yu. Zolotov, Cand. Sc., Senior Researcher, Institute for Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, 10/3, Akademicheskij avenue, Tomsk, 634055, Russian Federation. zolotov@asu.tusur.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5120-8985>

Received: 29.02.2024

Revised: 03.04.2024

Accepted: 16.05.2024