

УДК 550.47

DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4930

Шифр специальности ВАК: 1.6.21

Закономерности концентрирования ртути в годовых кольцах деревьев территорий Сибири (Россия) и Республики Вьетнам

Т.Х.Ш. Ле¹, Н.В. Барановская^{1✉}, Е.Е. Ляпина², М.Г. Крачнакова¹

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

² Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Россия, г. Томск

✉ nata@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. Метод дендрогеохимии позволяет определить концентрацию химических элементов в годовых кольцах деревьев. В рамках данной работы была проведена пространственно-временная реконструкция ртутного загрязнения локального и регионального происхождения. **Цель.** Определение особенностей распределения Hg в пространстве и на протяжении длительного времени с целью выявления основных факторов, влияющих на накопление Hg годовыми кольцами сосны, а также установление и выяснение закономерностей в аккумуляции Hg на каждой исследуемой территории. Объектом исследования является керн сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), (Томская, Иркутская области, Республика Бурятия) и сосны далатской (*Pinus dalatensis* Ferré) (Социалистическая Республика Вьетнам). **Методы.** Для исследования отобраны десять кернов в диапазоне календарных лет с 1930 по 2022 гг. Отбор проб проводился с помощью возрастного бурава Haglof. Количество и ширина годовых колец определены с точностью до 0,001 мм на приборе LINTAB в Институте мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск). Аналитика ртути выполнена на ртутном анализаторе РА-915+ методом атомной абсорбции (метод пиролиза) на базе Инженерной школы природных ресурсов Томского политехнического университета. **Результаты и выводы.** На аккумуляцию Hg древесиной сосны обыкновенной и сосны далатской на исследованных территориях влияние оказывают как природные, так и антропогенные факторы: естественная эманация Hg вследствие дегазации земной коры (Иркутская область и Республика Бурятия); локальный техногенез (Томская область), а также военные действия с применением химического оружия (Республика Вьетнам). В ходе исследования выполнена оценка динамики накопления Hg древесиной на протяжении 93 лет (1930–2021/2023 гг.). В период с 1930 и до конца 1960-х гг. наблюдаются повышенные средние содержания элемента на всех исследованных территориях. Повышенные концентрации Hg в данный период на территории Республики Вьетнам обусловлены трансграничным переносом ртути из континентальной части Восточной Азии, а также применявшимся в ходе войн химическим оружием; на территории России – ростом промышленного производства в годы Великой отечественной войны и послевоенного восстановления страны, а также сейсмичностью и геологическими условиями.

Ключевые слова: локальные территории Сибири (Российская Федерация) и Социалистической Республики Вьетнам, годовые кольца деревьев, дендрогеохимия, сосна обыкновенная, сосна далатская

Благодарности: Исследование проведено на базе Прибайкальского национального парка. Исследование выполнено за счёт грантов РНФ (№ 20-67-47005 и 20-67-47021). Обработка данных выполнена в рамках бюджетного проекта Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск).

Для цитирования: Закономерности концентрирования ртути в годовых кольцах деревьев территорий Сибири (Россия) и Республики Вьетнам / Т.Х.Ш. Ле, Н.В. Барановская, Е.Е. Ляпина, М.Г. Крачнакова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 2. – С. 215–230. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4930

UDC 550.47

DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4930

Patterns of mercury concentration in annual tree rings in Siberia (Russia) and the Republic of Vietnam

T.H.S. Le¹, N.V. Baranovskaya^{1✉}, E.E. Lyapina², M.G. Krachnakova¹

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

² Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russian Federation

✉ nata@tpu.ru

Abstract. Relevance. The method of dendrogeochemistry makes it possible to determine the concentration of chemical elements in tree rings. As part of this work, a spatio-temporal reconstruction of mercury pollution of local and regional origin was carried out. **Aim.** Determination of the characteristics of the Hg distribution in space and over a long time in order to identify the main factors affecting Hg accumulation by annual rings of pine, as well as the establishment and clarification of patterns in Hg accumulation in each study area. The object of the study is the core of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) (Tomsk, Irkutsk regions, Republic of Buryatia) and dalat pine (*Pinus dalatensis* Ferré) (Socialist Republic of Vietnam). **Methods.** Ten cores were selected for the study in the years range from 1930 to 2022. The sampling was carried out using the Haglof age drill. The number and width of annual rings are determined with an accuracy of 0.001 mm on the LINTAB device at the Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS (Tomsk). Mercury analysis was conducted 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. **Results and conclusions.** Hg accumulation by the wood of Scots pine and Dalate pine in the studied territories is affected by natural and anthropogenic factors: natural emanations of Hg due to the degassing of the Earth's crust (Irkutsk Region and the Republic of Buryatia); local technogenesis (Tomsk Region), as well as military actions using chemical weapons (Republic of Vietnam). The study assessed the dynamics of Hg accumulation by wood over 93 years (1930–2021/2023). In the period from 1930 to the end of the 1960s there is an increased average content of the element in all the studied territories. The increased concentrations of Hg in this period on the territory of the Republic of Vietnam related to the transboundary transport of mercury from the continental part of East Asia, as well as chemical weapons used during the wars; on the territory of Russia – the growth of industrial production during the Great Patriotic War and the post-war reconstruction of the country, as well as seismicity and geological conditions.

Keywords: local territories of Siberia (Russian Federation) and the Socialist Republic of Vietnam, tree rings, dendrogeochemistry, Scots pine, *Pinus dalatensis* Ferré

Acknowledgements: The study was conducted at the Pribaikalsky National Park. The research was carried out using the RSF grants (no. 20-67-47005 and 20-67-47021). The data processing was carried out within the framework of the budgetary project of Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk).

For citation: Le T.H.S., Baranovskaya N.V., Lyapina E.E., Krachnakova M.G. Patterns of mercury concentration in annual tree rings in Siberia (Russia) and the Republic of Vietnam. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 2, pp. 215–230. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4930

Введение

В настоящее время загрязнение окружающей среды увеличивается прямо пропорционально человеческой деятельности. Повышенные концентрации химических веществ в компонентах окружающей среды имеют двойную природу: естественный геохимический фон и антропогенное воздействие. В результате антропогенной деятельности, воздействие которой сохраняется в течение длительного времени, меняется химический состав и уровень накопления химических веществ в компонентах окружающей среды.

Одним из наиболее эффективных и экономичных методов мониторинга являются биологические индикаторы. В настоящее время для мониторинга качества окружающей среды используется множество биологических индикаторов, таких как кольца и листья деревьев, мхи, лишайники, хвоя, кораллы, а также шерсть животных и др. [1–8]. Для анализа динамики загрязнения окружающей среды широко применяются годовые кольца сосны, что обусловлено широким ареалом ее распространения и простотой датировки годовых колец.

Методы дендрохронологии и дендрохимии используются для оценки различных факторов,

влияющих на качество окружающей среды, и позволяют проводить реконструкцию исторических событий и загрязнений окружающей среды в природных компонентах [9]. Ртуть является глобально токсичным элементом. Уделяется всё больше внимания содержанию ртути в окружающей среде. Газообразная ртуть является одной из наиболее распространенных её форм, составляя более 95 % от общего количества её эмиссии. Данная форма ртути может переноситься на дальние расстояния из-за относительно длительного времени нахождения паров ртути в атмосферном воздухе (от пяти месяцев до двух лет), а затем выпадать на подстилающую поверхность в результате влажного и сухого осаждения [10]. Растительность играет важную роль в биогеохимическом цикле Hg, который представлен тремя механизмами ассимиляции Hg: через корни, листву и кору [11].

В 1975 г. N.W. Lepp провел краткий обзор путей поглощения и факторов, регулирующих поступление металлов в растения. В гипотезе В.Е. Cutter and R.P. Guyette и S.A. Watmough показано, что в области дендрохимии химический состав кольца дерева отражает часть химического компонента окружающей среды [11–13]. На накопление элементов в годовом кольце влияют не только условия окружающей среды, но и физиологические процессы в самом дереве [14, 15]. В настоящее время учёные уделяют особое внимание использованию древесины, хвои деревьев, лишайников в качестве биоиндикаторов для пространственного и временного мониторинга концентраций загрязняющих веществ [4–6].

Предыдущие литературные исследования показали, что при последовательном формировании химического состава годовых колец они фиксируют информацию об изменениях в биосфере за длительный период времени [10, 16, 17]. Однако воз-

можно перераспределение элементов между годовыми кольцами, которое в значительной степени зависит от путей поглощения и подвижности химических элементов в тканях растений [18].

Ртуть поступает в древесину деревьев в результате естественных процессов (дегазация земной коры и геологические особенности территорий) или в результате антропогенной деятельности (рис. 1, а). Данные о содержании ртути в годовых кольцах деревьев могут быть использованы для создания глобальной карты распределения ртути, что внесёт вклад в архив данных. Для прогнозирования будущих изменений в цикле ртути в лесных экосистемах необходимо более глубокое понимание механизмов поступления и трансформации ртути в древесных растениях.

В литературе описаны такие пути поступления ртути в годовые кольца деревьев, как: поглощение из почвы корнями; поглощение из воздуха листвой и транслокация через флоэму в кольцо; перенос через кору [11]. В настоящее время исследователи в основном согласны с тем, что ртуть в годовые кольца деревьев поступает из атмосферного воздуха [3, 10, 17, 18, 24].

В последнее время был проведен ряд исследований на предмет динамики накопления ртути годовыми кольцами (рис. 1, б) [1, 3–10, 17, 18, 23, 25]. В качестве природных источников Hg можно назвать вулканическую деятельность, эрозию, дегазацию земной коры [1, 4, 5, 26], а также поступление в результате землетрясений, ураганов и наводнений [27, 28].

Антропогенные выбросы Hg в окружающую среду связаны с металлургической, химической промышленностью, сжиганием твёрдых бытовых и биомедицинских отходов, электронной, бумажной, фармацевтической промышленностью и сжиганием углеводородов.



Рис. 1. Соотношение вклада основных источников в глобальную эмиссию ртути: а) [19–22]; б) концентрации Hg в годовых кольцах разных видов сосны в различных районах исследования [3, 5, 7, 10, 23]

Fig. 1. Ratio of the contribution of the main sources to global mercury emissions: а) [19–22]; б) concentrations of Hg in annual rings of different pine species in different study areas [3, 5, 7, 10, 23]

На основе анализа керна деревьев было установлено, что содержание ртути в годовых кольцах деревьев зависит от расстояния между точкой отбора проб и источником выбросов [3, 29].

Обзор научных работ, в которых были систематизированы данные о распространении и возможном источнике эмиссии ртути, связанной с твёрдыми аэрозолями в различных регионах, таких как Северная Америка, Европейский союз и страны Азии (Китай, Япония, Южная Корея, Турция, Израиль, Индия и Непал), даёт представление о содержании Hg в атмосфере. Концентрации Hg в северном полушарии примерно на порядок выше, чем в южном, и её распределение тесно коррелирует с исходными регионами и транспортными путями [30]. Большая часть промышленных предприятий расположена в северном полушарии, что приводит к преобладанию выбросов ртути в данном регионе. Китай, Индия, Соединенные Штаты, Япония и Южная Корея – страны, характеризующиеся быстрой индустриализацией и повышенными концентрациями ртути в компонентах окружающей среды [31].

Глобальное загрязнение ртутью можно связать с четырьмя основными источниками: антропогенная деятельность (2220 т/год) [19], пожары (600 т/год) [20–22], поверхностная геобиоактивность, испарения из почвы и растительности (1300 т/год) [20, 22], а также испарение с поверхности мирового океана (2300 т/год) [20, 22]. Статистические данные показывают, что растительность поглощает примерно четверть общего количества Hg в глобальной атмосфере, что составляет от 4400 до 5300 т/год [24].

Объекты и методика исследования

Объектом исследования выбраны два вида сосны. Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), отобранная на территории России (Томская и Иркутская области и Республика Бурятия). Этот вид имеет обширный ареал распространения на Евразийском материке: от Атлантического океана на западе до Тихого океана на востоке, от Заполярья на севере до Черноморского побережья на юге. В России сосна обыкновенная распространена по всей территории. Сосна далатская, или пятиигольчатая сосна (*Pinus dalatensis* Ferré), произрастающая в высоко-

горных районах Лаоса и Вьетнама на высоте от 600 до 2600 м над уровнем моря, является эндемиком Вьетнама. На протяжении десятилетий ареал обитания этого вида сокращается вследствие индустриализации и урбанизации [32]. В связи с этим Международный союз охраны природы предложил включить далатскую сосну в список приоритетных видов для сохранения [33].

Данные виды сосен, произрастают в разных географических регионах, каждый из которых характеризуется различными климатическими и геологическими условиями. Тем не менее оба вида обладают чётко и хорошо различимыми границами годовых колец (рис. 2). Значительное количество предыдущих исследований продемонстрировало эффективность использования видов сосны для решения задач в области дендрохронологии и дендрогеохимии [1, 5, 7, 16, 32, 34, 35].

В период с 2021 по 2023 гг. были отобраны образцы кернов деревьев в конце вегетационного периода в трёх регионах России (Томской, Иркутской областях и Республике Бурятия) и в двух регионах центрального нагорья Социалистической Республики Вьетнам (г. Далат и провинции Даклак). Выбор мест отбора проб проводился с учетом расположения промышленных объектов. В районах, где поток Hg зависит от естественных процессов, таких как сейсмическая активность, точки отбора проб располагаются вдоль и вкрест простирания разломов рифтовой зоны.

Томская, Иркутская области и Республика Бурятия представляют собой три крупных региона Сибири. На территории Томской области были найдены россыпные месторождения золота в долинах рек. Однако при разведке коренных месторождений золота типичные примеси ртути (0,12–0,6 %) были обнаружены на правом берегу нижнего течения р. Тугояковки, в среднем и верхнем течении рек Ушайки и Киргизки, а также в районе острова Айдаковский р. Томи. Все эти объекты рассматриваются как естественные источники поступления ртути в компоненты окружающей среды, в том числе и в растения.

Территория Томской области считается спокойной в сейсмотектоническом отношении.



Рис. 2. Фотография возрастного керна сосны далатской (*Pinus dalatensis* Ferré) (а) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) из Томской области (б) (справа – кора; слева – сердцевина)

Fig. 2. Photo of an age core of *Pinus dalatensis* Ferré (a) and Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) from the Tomsk Region (b) (bark is on the right; heartwood is on the left)

Однако наблюдаются техногенные землетрясения с промышленными взрывами разного назначения (сила толчка достигала 3–4 баллов) [36]. Также были установлены обширные ореолы с повышенным содержанием ртути в компонентах окружающей среды (почвы, твердый осадок снега, годовые кольца деревьев, биосубстраты человека) на территории Сибирского промышленного узла (г. Томск) [2, 9, 16, 37–42].

Как известно, Иркутская область и Республика Бурятия расположены на стыке двух тектонических образований от южной части Сибирской платформы до Байкальской рифтовой зоны, что создает сильную сейсмическую активность и землетрясения, которые являются природным источником эманации ртути [43, 44]. В акватории озера Байкал часто происходят землетрясения высокой интенсивности. По статистическим данным в мае 1981 г. произошло сильное землетрясение ($K=14,0$, $M=5,4$), с июня по ноябрь 2022 г. зафиксировано шесть землетрясений ($K=9,5–14,2$) с эпицентрами в 5 км друг от друга и также землетрясения с меньшей интенсивностью ($K=4$) в населённом пункте Тунка [45].

С 1970-х гг. в Иркутской области были размещены ведущие промышленные комплексы России, включая тепловые электростанции, металлургические предприятия, химическую и целлюлозно-бумажную промышленности. Вследствие чего сформировалась техногенная зона ртутного загрязнения [46]. Высокие уровни содержания Hg были отмечены в разных природных объектах Иркутской области [47].

Наибольший вклад в суммарные выбросы Hg на территории Республики Бурятия вносят предприятия теплоэнергетики (ТЭЦ-1, ТЭЦ-2), котельные (доля угля составляет 75–85 %), авиастроение, печное отопление, выбросы автотранспорта, чёрная и цветная металлургия, добыча золота, коксохимическое производство, производство цемента, известня и целлюлозно-бумажная промышленность [48].

Город Далат расположен в центральной нагорье в южно-центральной части Вьетнама, на плато Лангбианг. Экономика территории характеризуется в основном туризмом, сельским хозяйством (выращивание цветов, кофе и чая), где отсутствуют крупная промышленная деятельность и потенциальные источники выбросов ртути. Во Вьетнаме основными источниками ртути, вносящими вклад в глобальный биогеохимический цикл, являются сжигание ископаемого топлива и кустарная золотодобыча. Кроме того, зафиксирован трансграничный перенос ртути с Восточно-Азиатского континента в районы, расположенные ниже по морскому течению, такие как Япония, Тайвань и северная часть Восточного моря [49]. Однако потоки ртути из Во-

сточной Азии изучаются в основном в регионах с умеренным климатом, поэтому необходимо больше данных для сравнительного анализа в тропических регионах, таких как Вьетнам [50]. Последние исследования показывают, что присутствие ртути в воздушных массах из Китая может значительно превышать уровни содержания связанной с PM_{2.5} и газообразной элементарной ртути в Хошимине [50–52].

Для проверки предположений предыдущих исследований о главных факторах потоках поступления Hg в годовые кольца на каждой территории нами были созданы схематические карты отбора проб. Иркутская область и Республики Бурятия характеризуется природными [1, 4, 5]; Томская область – антропогенными источниками [6, 38]. Республика Вьетнам относится к развивающимся странам, экономическое развитие которой началось только после окончания войны с 80-х гг. прошлого века. Схема отбора проб составлена с учетом расположения относительно источников антропогенного воздействия, хроники военных действий, а также влияния трансграничного переноса экотоксикантов в подветренные регионы [49, 50, 52].

В Томском районе выбраны четыре точки отбора проб, которые находятся под воздействием крупнейшего промышленного центра Томской области – северного промышленного узла (рис. 2). Две точки расположены в ближней зоне: в непосредственной близости от исследовательского ядерного реактора Томского Политехнического университета («Реактор») и ООО «Томскнефтехим» («Нефтехим»). Другие две точки находятся с противоположной стороны от города: в населённом пункте Пашино («Пашино») и мкр. Тимирязево («Тимирязево») [8].

В Иркутской области и Республике Бурятия точки выбраны в удалённых районах за пределами городов, в зоне эпицентров землетрясений высокой интенсивности (Байкальская рифтовая зона) (рис. 2). На территории Иркутской области выбраны две точки: кордон Харгино («Харгино») на территории Прибайкальского национального парка, а также вблизи посёлка Песчаное («Песчанка») на острове Ольхон. На территории Республики Бурятия керны сосны отобраны рядом с р. Жохой (база «Снежный барс» Тункинского района («Тунка»)).

В Республике Вьетнам принцип выбора точек отбора проб обусловлен историей техногенного воздействия на природную среду (рис. 3). В рамках данного исследования были выбраны две локации на юго-востоке города Далат, где с 1930 г. активно функционировали чайные плантации и лесопильные предприятия. Также во внимание оказалась единственная железнодорожная линия, связывающая г. Далат с г. Тхапчам в провинции Ниньтхуан в военный период

с 1932 по 1972 гг. На сегодняшний день в юго-восточном регионе республики расположены зоны сельскохозяйственного производства и предприятия по переработке сельскохозяйственной продукции, в то время как в других районах в основном развивается туризм. Кроме того, контрольная проба отобрана в провинции Даклак, которая расположена в 250 км к северу от центра г. Далат. На данной территории отсутствует промышленное воздействие на окружающую среду, что позволяет оценить глобальный уровень выпадения Hg.

Древесный керн извлекался с помощью возрастного бурава, согласно установленным рекомендациям [53], из двух рядом стоящих деревьев примерно одинакового возраста, высоты дерева и диаметра ствола. Всего было отобрано и изучено 10 древесных кернов. Извлечённые керны помещались в бумажные пеналы с указанием номера точки, времени и места отбора. Процесс пробоподготовки включал в себя: высушивание кернов при

комнатной температуре до постоянной массы, размещение в деревянных пеналах. Годовые кольца были разделены по годам, согласно [53], и проанализированы. Измерение ширины годового кольца выполнено с точностью до 0,01 мм с помощью прибора LINTAB с программным обеспечением TSAP-Win в лаборатории динамики и устойчивости экосистем в Институте мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск).

Измерение содержания Hg в кольцах деревьев проводилось атомно-абсорбционным методом на анализаторе ртути РА-915+ с приставкой ПИРО-915 (предел обнаружения Hg – 5 нг/г, точность определения – 5 нг/г, концентрации элемента рассчитаны на 1 г сухого вещества) в учебно-научной лаборатории на базе Инженерной школы природных ресурсов Томского политехнического университета. Биологическая матрица пробы разлагалась методом пиролиза при температуре 580 °С. Всего проанализировано 830 проб.

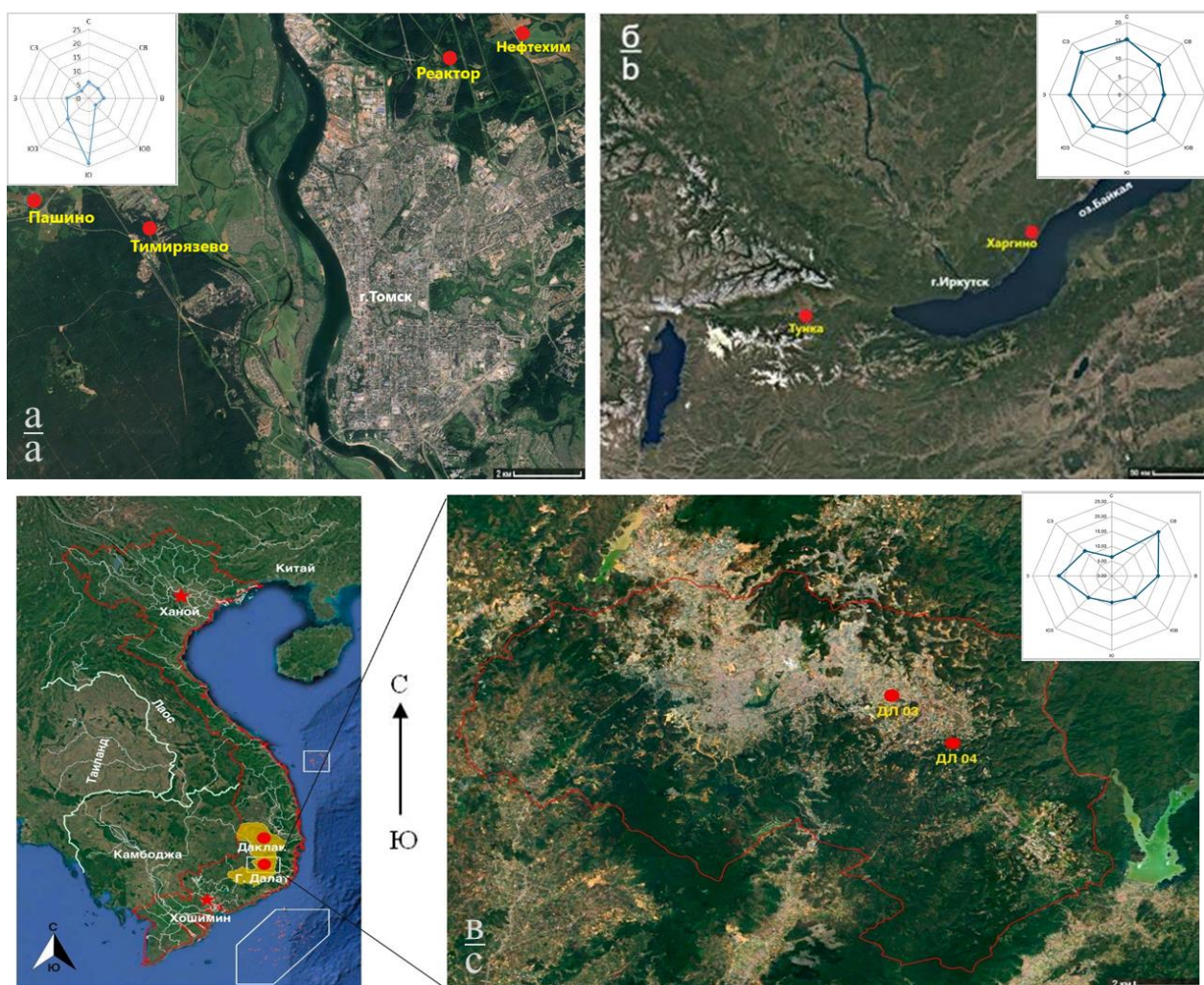


Рис. 3. Карта-схема размещения точек отбора проб: а) Томская область; б) Иркутская область и Республика Бурятия; в) г. Далат

Fig. 3. Map-scheme of the sampling points location: a) Tomsk region; b) Irkutsk region and the Republic of Buryatia; c) c. Dalat

В рамках исследования был проведён анализ содержания ртути в кернах на рассматриваемых территориях за период с 1930 по 2023 гг. Продолжительность временного ряда варьировалась от 80 до 93-х лет. Для удобства предоставления полученных данных концентрации ртути приведены с усреднением за 10 лет: 1930–1939, 1940–1949, 1950–1959, 1960–1969, 1970–1979, 1980–1989, 1990–1999, 2000–2009, 2010–2019 и 2020–2023.

Все статистические анализы и графические представления выполнены с помощью программного пакета Microsoft Excel. Методы пакета Statistica использованы для выявления связи содержания Hg в зависимости от территориальной принадлежности.

Результаты исследования и их обсуждение

Распределение концентраций Hg в древесных кернах исследованных территорий и отдельных сосен крайне неравномерно, что подтверждается результатами расчета коэффициента вариации (73–331 %). Средние содержания Hg характеризуются широким размахом и значительно различаются между регионами: Иркутская область – $20 \pm 1,6$ нг/г, Республика Бурятия – $13 \pm 2,7$ нг/г, Республика Вьетнам – 582 ± 180 нг/г, Томская область – 118 ± 36 нг/г (табл. 1). Следует отметить, что годовые кольца сосны Вьетнама и Томской области выделяются повышенными значениями (табл. 1).

Концентрации Hg в Республике Вьетнам находятся в пределах 5–11510 нг/г. Максимальными

содержаниями Hg характеризуются две точки г. Далат, где содержание Hg в годовых кольцах сосны фиксируется свыше 870 нг/г. Минимальное содержание Hg отмечается в точке, расположенной в 280 км к юго-западу от центра г. Далат.

На территории Томской области концентрации Hg колеблются в пределах 5–3986 нг/г, максимальное содержание наблюдается в точке «Нефтехим», минимальное – в точке «Реактор».

На территории Иркутской области концентрации Hg меняются в пределах 5–100 нг/г. Максимальное содержание Hg отмечается в точке «Песчанка», и минимальное – в точке «Харгино». Точки, расположенные в Республике Бурятия, характеризуются содержанием элемента в пределах от 2–101 нг/г, в кернах точки «Тунка» средние содержания ртути равны $13,0 \pm 2,7$ нг/г.

Расхождение в средних содержаниях Hg в древесине сосны, отобранной на территории Вьетнама и России, может быть связано с особенностями промышленной нагрузки, естественными геохимическими условиями, а также климатом (тропический и умеренный, соответственно).

Изучение характера накопления ртути на каждой из территорий мы объясняем с точки зрения геоэкологической обстановки, формирующейся в ходе исторического развития. Из рис. 4 следует, что поступление Hg в кернах сосны Томской области достигло своего пика в 1940–1949 гг., за исключением точки «Реактор».

Таблица 1. Сравнительная характеристика содержаний Hg (нг/г) в годовых кольцах деревьев исследуемых территорий

Table 1. Compared statistics of Hg concentrations (ng/g) in annual tree rings in different study areas

Точка Point		Возраст, лет Age, years	Среднее Mean	мин-макс медиана min-max median	Стандартное отклонение Standard deviation	Коэффициент вариации Variation coefficient
Томская область Tomsk Region	Тимирязево Timiryazovo	80	133,7±23,9	5-1170 47,0	214,7	161
	Пашино Pashino	80	127,6±47,2	5-3505 17,7	424,5	332
	Реактор Reactor	93	67,3±21,6	5-1953 27,0	207,9	309
	Нефтехим Neftekhim	81	146,1±51,2	5-3986 29,0	463,4	317
Республика Бурятия Republic of Buryatia	Тунка Tunka	93	12,6±2,7	5-101 7,3	16,7	132
Иркутская область Irkutsk Region	Песчанка Peschanka	87	26,2±2,1	5-100 21,1	19,3	73
	Харгино Khargino	93	13,3±1,1	5-67 10,5	10,5	80
Вьетнам Vietnam	Даклак Daklak	93	12,4±1,1	5-65 10	10,9	88
	ДЛО3 DL03	93	882,9±207,1	5-11380 12,3	2017,4	227
	ДЛО4 DL04	82	876,4±272,9	5-11510 6,7	2471,5	282

Накануне Великой Отечественной войны (1941–1945 гг.) промышленный сектор Томской области оставался слабо развитым и включал в себя такие отрасли, как производство строительных материалов, пищевая, лесная и деревообрабатывающая промышленности. На начальном этапе войны в Томской области была проведена конверсия производства для обеспечения фронта предметами первой необходимости и вооружением. Вследствие чего из европейской части страны в Томск было эвакуировано более 30 промышленных предприятий, и уже к концу 1941 г. половина эвакуированных предприятий начала выпускать продукцию [54].

В интервале 1940–1949 гг. объем производства продукции вырос во всех отраслях, кроме пищевой промышленности. В послевоенные 1950–1959 гг. основными отраслями промышленности были машиностроение и металлообработка, лесная, деревообрабатывающая и пищевая, на долю которых приходилось 59,2, 15,6 и 10,1 % соответственно. С 1940 по 1960 гг. работала железнодорожная линия Асино–Томск–Тайга, связывавшая областную столицу с тремя соседними административными районами [54].

Интересно отметить, что керн сосны в точке «Реактор» является самым «старым» из четырех собранных образцов. Максимальное содержание Hg в точке «Реактор» отмечено в период 1930–1939 гг. со средним содержанием 308 нг/г.

Как свидетельствуют данные табл. 1, выявлено заметное несоответствие амплитуды среднего содержания в одном из районов Иркутской области по сравнению с двумя другими районами. Как в точке «Песчанка», так и в точке «Харгино» содержание Hg было относительно равномерным во все периоды. Однако в период с 1940 по 1989 гг. содержание ртути заметно увеличилось и достигло 37 и 16 нг/г, соответственно. Тенденция локальных эмиссий Hg характеризуется местными факторами, связанными с региональной сейсмической активностью, антропогенной деятельностью. Во время Великой Отечественной войны промышленность Западной Сибири была ориентирована на мощное развитие. В районе озера Байкал были построены крупные заводы, но после распада Советского Союза развитие затормозилось [54, 55]. В точке «Тунка» поступление ртути в керн сосны имеет идентичный тренд в период с 1940 по 1949 гг., который отмечается максимальным всплеском содержания ртути, наблюдаемый в керне сосны Томской области и Республике Вьетнам.

Пиковые значения содержания элемента в юго-западном Прибайкалье совпадают также с датами сильных землетрясений (рис. 5): 1912 (M=5,3), 1924 (M=4,9), 1926 (M=4,8), 1928 (M=5), 1950 (M=7), 1956 (M=4,5; 5), 1975 (M=8,1); 1959 (M=9); 1963 (M=4,5), 1967 (M=7,8); 1973 (M=4,5), 1980 (M=4,5), 1981

(M=5), 1982 (M=4,1–4,6), 1986 (M=4,1), 1988 (M=4,1), 1989 (M=4,7), 1994 (M=6,5); 1995 (M=5,9), 1999 (M=6), 2008 (M=6,3), 2014 (M=6), 2019 (M=6), 2021 (M=6,7).

Поток ртути в годовые кольца сосны в Центральном нагорье Вьетнама имеет максимальные концентрации в период 1940–1969 гг. До 1940 г. было завершено строительство инфраструктуры, включая электростанцию (1927 г.), дороги, соединяющие город Далат с соседними районами (1937 г.), железнодорожный вокзал Далат (1938 г.), университет Далат (1939 г.). Кроме того, в этот период население города заметно увеличилось, в основном за счет притока рабочих и туристов. Если в 1923 г. население составляло 1500 человек, то к 1940 г. оно достигло 11500 человек. Кроме этого, геохимические условия местности и проявления рудного золота, сопровождаемые примесями Ag, Pb-Zn, Cu и As, также могут способствовать синхронизации поступления Hg в атмосферу [56].

На рис. 6 (ДЛ03, ДЛ04) показана корреляция между динамикой содержания ртути в сосновых кернах и историческим периодом войны за защиту Отечества против японского империализма (1940–1945 гг.), Первой Индокитайской войны против Французского колониализма (1946–1954 гг.) и Второй Индокитайской войны против Американского империализма (1955–1975 гг.). Очевидно, что количество пиковых концентраций и периоды их локализации во временном интервале совпадают с хронологией военных конфликтов.

Вторая Индокитайская война удерживает исторический рекорд по самому большому количеству сброшенных бомб. ВВС США использовали 7662000 т взрывчатых веществ, что в 3,7 раза больше по сравнению с общим количеством взрывчатых веществ, использованных всеми странами во время Второй мировой войны (1939–1945 гг.). Во время войны в Юго-Восточной Азии гербициды широко применялись в военных целях, преимущественно для дефолиации густых тропических лесов с целью обнаружения вражеских военных и снабженческих подразделений и в меньшей степени – для уничтожения сельскохозяйственных культур и в различных других целях. Военное применение гербицидов в Южном Вьетнаме началось в 1962 г., значительно расширилось в 1965 и 1966 гг. и достигло пика в 1967–1969 гг. [57].

Возможно, что пик содержания Hg, фиксирующийся на период между 1940 и 1949 гг. и не совпадающий с периодом распыления США токсичных химикатов в Южном Вьетнаме, может объясняться либо глобальными выпадениями, либо внутренним перетоком. Тем не менее возможность переноса химических веществ между кольцами посредством радиальной диффузии остаётся гипотезой, которая пока не получила эмпирического подтверждения.

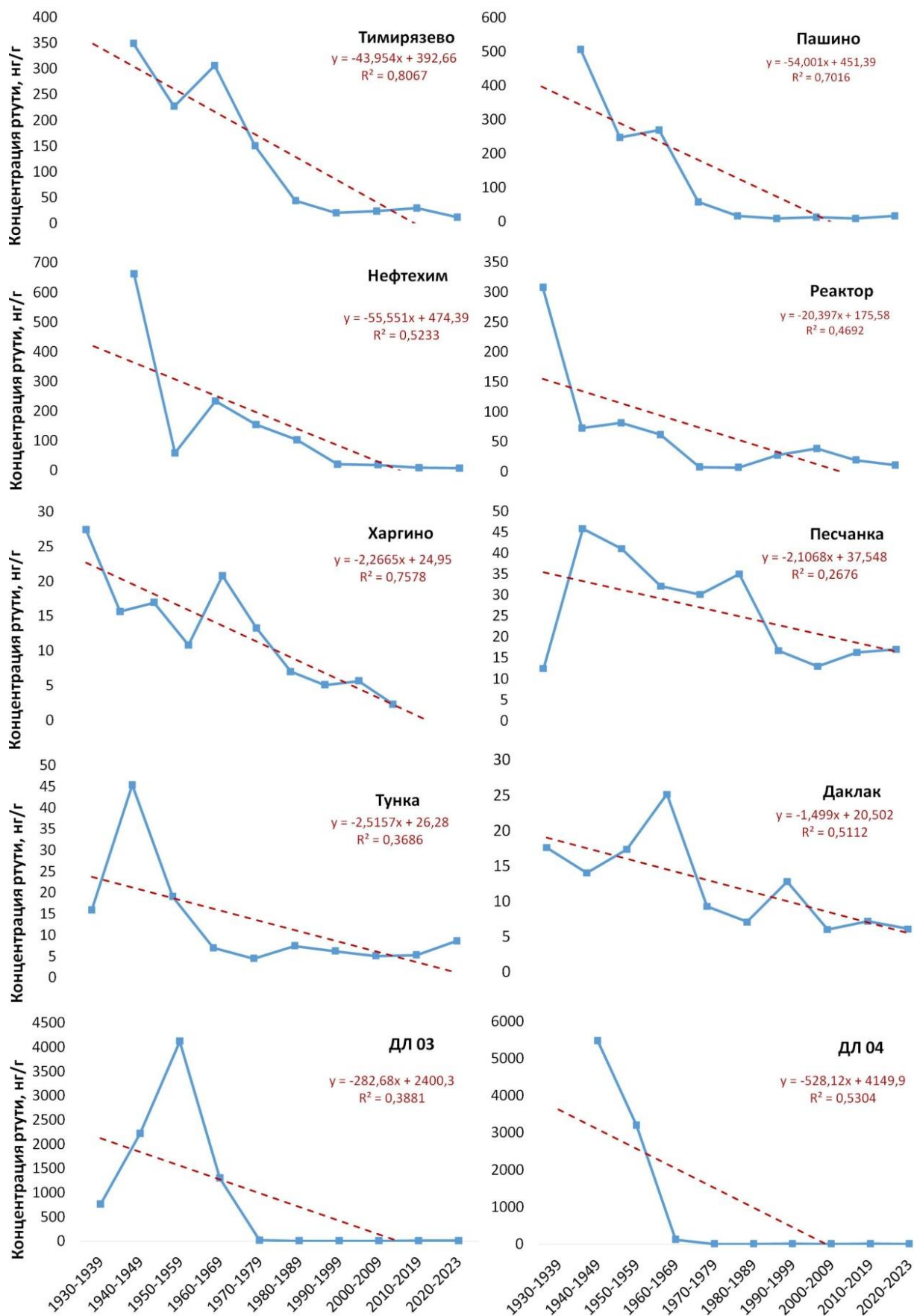


Рис. 4. Динамика хронологии содержания ртути в древесине сосны на территории исследования
Fig. 4. Dynamics of mercury chronology in pine wood in the study area

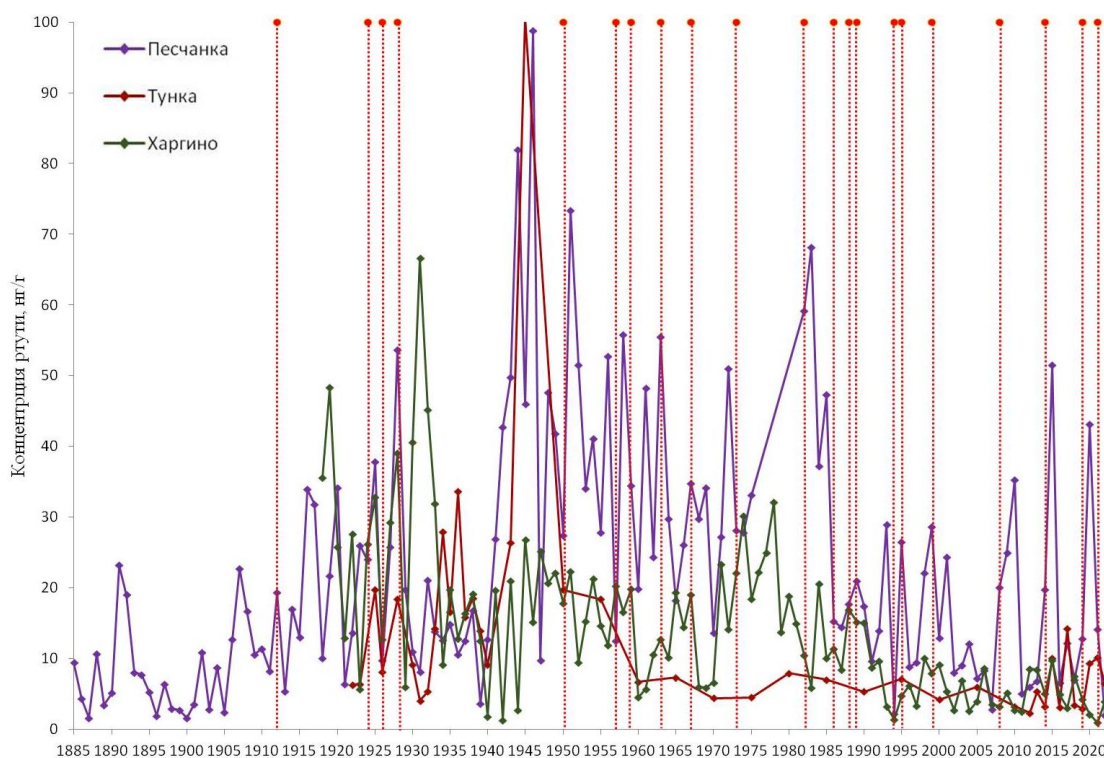


Рис. 5. Концентрация ртути в древесных ядрах на территории Юго-западного Прибайкалья (пунктир – землетрясения с $M > 4,0$)

Fig. 5. Mercury concentration in wood cores in the territory of the South-Western Baikal region (dotted line – earthquakes with $M > 4.0$)

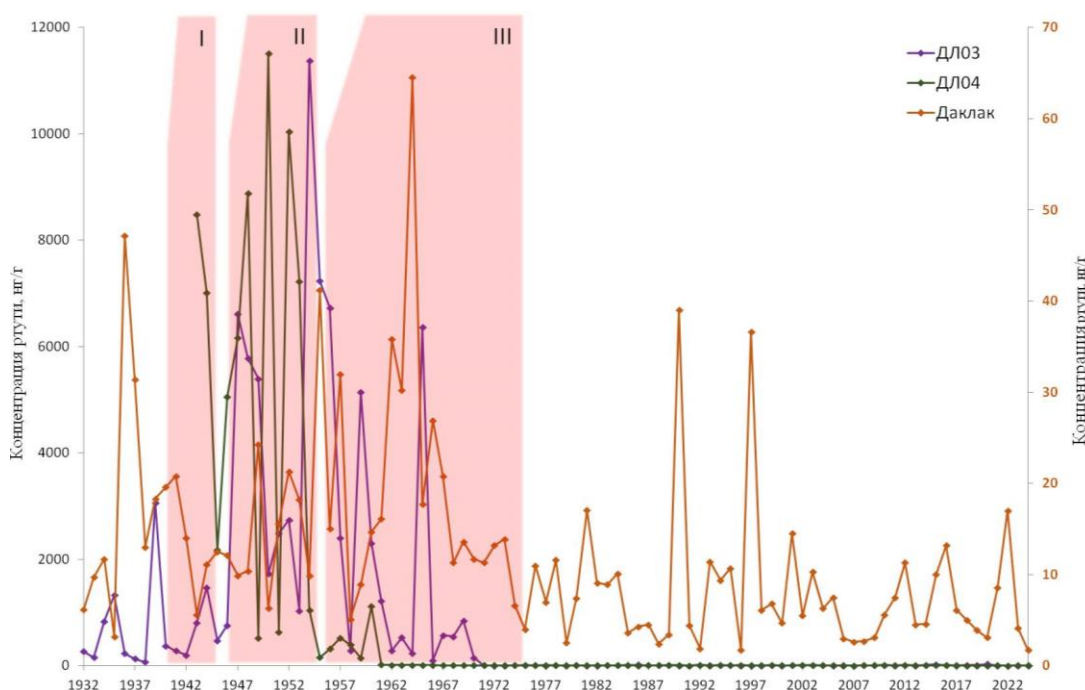


Рис. 6. Концентрация ртути в древесных ядрах на территории Республики Вьетнам: I – война за защиту Отечества против японского империализма (1940–1945 гг.); II – Первая Индокитайская война против Французского колониализма (1946–1954 гг.); III – Вторая Индокитайская война против Американского империализма (1955–1975 гг.)

Fig. 6. Mercury concentration in wood cores in the Republic of Vietnam: I – the War for the Defense of the Fatherland against Japanese imperialism (1940–1945); II – the First Indochina War against French colonialism (1946–1954); III – the Second Indochina War against American imperialism (1955–1975).

Следует отметить, что содержание Hg в кернах сосны на 2-й территории провинции Даклак во Вьетнаме, где диапазон содержания ртути колеблется от 6 до 25 нг/г, соответствует амплитуде колебаний в точке «Харгино» Иркутской области (5–27 нг/г).

На территории Сибири и во Вьетнаме максимальные значения ртути в кольцах приходятся на период 40-х и 60-х гг. XX в. Для данных периодов характерно активное промышленное развитие и наращивание военного производства. В результате исследования можно утверждать, что максимальные всплески на многих территориях отмечаются независимо от геологического фактора. Глобальная эмиссия ртути характерна именно в период 1940–1969 гг. [58, 59].

В результате исследования выявлено, что для большинства территорий, независимо от их особенностей, в период с 1930 по 1969 гг. отмечается максимальный всплеск концентрирования Hg. Сходство распределения Hg во времени заключается в том, что содержание Hg в период 1930–1969 гг. превышает среднее значение за весь исследуемый период во всех четырех районах: примерно в 2,2 раза в Томской области, в 1,5 раз в Республике Бурятия, в 1,3 раза в Иркутской области и в 2,7 раз во Вьетнаме (рис. 5).

Максимальное значение отмечается в керне сосны Вьетнама (1569 нг/г), что превышает содержание в период 1970–2023 гг. (8 нг/г) в 193 раза, и среднее значение за весь исследуемый период (582 нг/г) – в 2,7 раза. Минимальное содержание ртути в интервале 1930–1969 гг. отмечено в Республике Бурятия и в Иркутской области (20 и 25 нг/г, соответственно), что по сравнению с данными после 1970 г. и за весь исследуемый период выше в 3,3 и 1,5 раза, а также в 1,7 и 1,3 раза, соответственно. В Томской области среднее содержание ртути 260 нг/г (1930–1969 гг.), что в 6 раз ниже, чем во Вьетнаме, и в 10 раз выше, чем в Иркутской области. Примечательно, что период с 1930 по 1969 гг. совпадает со значительным ростом научно-технического прогресса.

Для выявления общих закономерностей поступления ртути в древесину сосны использовали корреляционный анализ. Значимость средних концентраций элемента между годами оценивалась с помощью нулевой гипотезы при 5 % уровне надежности. Выявлена связь в накоплении поллютанта древесиной на участках «Пашино»–«Тимирязево» ($r=0,32$; при $P<0,05$) и «Тимирязево»–«Реактор» ($r=0,22$; при $P<0,05$), «ДЛ03»–«ДЛ04» ($r=0,3$; при $P<0,01$), «Тунка»–«Песчанка» ($r=0,35$; при $P<0,01$).

Тенденция накопления Hg в годовых кольцах деревьев за весь период с 1930 по 2021 гг. проиллюстрирована на рис. 4. В данном исследовании была реконструирована история загрязнения и тенденция потока Hg в годовых кольцах деревьев.

Кроме того, для выявления характера изменения концентраций Hg с течением времени применялся линейный регрессионный анализ. Графики линейной регрессии всех изученных точек отбора проб демонстрируют тенденцию к снижению концентраций за весь период исследования.

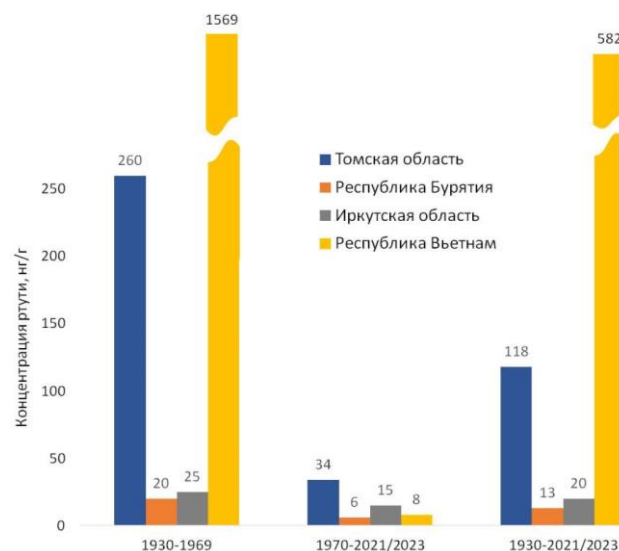


Рис. 7. Периоды накопления ртути древесиной сосны обыкновенной и далатской на исследуемых территориях: 1 – Томская область; 2 – Республика Бурятия; 3 – Иркутская область; 4 – Вьетнам

Fig. 7. Periods of mercury accumulation by Scots pine and Dalat pine cores in different territories: 1 – Tomsk region; 2 – Republic of Buryatia; 3 – Irkutsk region; 4 – Vietnam

Заключение

На аккумуляцию Hg древесиной сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и сосны далатской (*Pinus dalatensis* Ferré) на исследованных территориях влияние оказывают как природные, так и антропогенные факторы: естественная эманация Hg вследствие дегазации земной коры (Иркутская область и Республика Бурятия); локальный техногенез (Томская область), а также военные действия с применением химического оружия (Республика Вьетнам). В ходе исследования оценена динамика особенностей накопления Hg древесиной на протяжении 93 лет (1930–2021/2023 гг.). В период с 1930-х и до конца 1960-х гг. наблюдаются повышенные средние содержания элемента на всех исследованных территориях. Кратность превышения составляет от 1,7 до 196 раз по сравнению с последующим временным интервалом и от 1,3 до 2,7 раз относительно среднего по выборке. Повышенные концентрации Hg в период 1940–1969 гг. на территории республики Вьетнам обусловлены трансграничным переносом ртути из континентальной части Восточной Азии, а

также применявшимся в ходе Вьетнамской войны химическим оружием, а на территории России – ростом промышленного производства в годы Великой Отечественной войны и послевоенного восстановления страны. Анализ хронологии ртути в древесине сосны всех исследованных деревьев указывает на

уменьшение уровня содержания Hg с 1970-х гг. до современного периода. Наблюдается вариативность накопления элемента в зависимости от естественно-го геохимического фона, обусловленного сейсмичностью и геологическими условиями, техногенной нагрузкой и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эманиации ртути Байкальского рифта по данным изучения годовых колец деревьев (на примере Тункинской впадины) / Л.П. Рихванов, Е.Е. Ляпина, Д.В. Юсупов, Е.М. Турсуналиева, А.А. Павлова // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2021. – Т. 496 – № 1. – С. 30–35. DOI:10.31857/S2686739721010199.
2. Черненко Е.В. Динамика изменения элементного состава природной среды по данным изучения гербарных и современных сборов растений юга Сибири: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2016. – 262 с.
3. Poplar tree (*Populus Balsamifera* L.) as indicator of mercury emission from a point source / D.V. Yusupov, E.E. Lyapina, E.M. Tursunaliyeva, N.A. Osipova, N.V. Baranovskaya // Chemosphere. – 2022. – Vol. 287. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.132157.
4. Турсуналиева Е. М. Экогеохимия ртути в древесных растениях рода тополь (листьях и годовых кольцах) урбанизированных территорий Сибири и Дальнего Востока : дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2022. – 140 с.
5. Юсупов Д.В. Методология биогеохимической индикации урбанизированных и горнопромышленных территорий на основе анализа древесной растительности: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Томск, 2022. – 344 с.
6. Ляпина Е.Е. Экогеохимия ртути в природных средах Томского региона: дис. ... канд. геол.-мин. наук. – Томск, 2012. – 154 с.
7. Ляпина Е.Е. Эколого-геохимические особенности накопления ртути древесиной хвойных растений на территории Алтайского края // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 4 (52). – С. 95–109. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.4/19.
8. Дендрохимия Hg по данным изучения сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) на территории Томского района / Е.Е. Ляпина, Т.Х.Ш. Ле, 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: <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/8/4602>
9. Рихванов Л.П., Архангельская Т.А., Замятина Ю.Л. Дендрорадиография как метод ретроспективной оценки радиозоологической ситуации: монография. – Томск: Дельтаплан, 2015. – 148 с.
10. Method to measure tree-ring width, density, elemental composition, and stable carbon and oxygen isotopes using one sample / C. Xu, Y. Zhao, W. An, Q. Zhao, Y. Liu, M. Sano, T. Nakatsuka // Journal of Forestry Research. – 2024. – Vol. 35(1):56. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11676-024-01707-9>.
11. Lepp N.W. The potential of tree-ring analysis for monitoring heavy metal pollution patterns // Environmental Pollution. – 1970. – Vol. 9. – P. 49–61. DOI: 10.1016/0013-9327(75)90055-5.
12. Cutter B.E., Guyette R.P. Anatomical, chemical, and ecological factors affecting tree species choice in dendrochemistry studies // Journal of Environmental Quality. – 1993. – Vol. 22. – P. 611–619. DOI: 10.2134/jeq1993.00472425002200030028x
13. Watmough S.A. Monitoring historical changes in soil and atmospheric trace metal levels by dendrochemical analysis // Environmental Pollution. – 1999. – Vol. 106 (3). – P. 391–403. DOI: 10.1016/s0269-7491(99)00102-5.
14. Watmough S.A., Hutchinson T.C. Historical changes in lead concentrations in tree-rings of sycamore, oak and Scots pine in north-west England // Science of the Total Environment. – 2002. – Vol. 293. – P. 85–96. DOI: 10.1016/s0048-9697(01)01149-4.
15. Watmough S.A., Hutchinson T.C. Uptake of 207Pb and 111Cd through bark of mature sugar maple, white ash and white pine: a field experiment // Environmental Pollution. – 2003. – Vol. 121 (1). – P. 39–48. DOI: 10.1016/s0269-7491(02)00208-7.
16. 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.
17. Characterization of mercury concentration from soils to needle and tree rings of Schrenk spruce (*Picea schrenkiana*) of the middle Tianshan Mountains, northwestern China / H. Kang, X. Liu, J. Guo, B. Wang, G. Xu, G. Wu, S. Kang, J. Huang // Ecological Indicators. – 2019. – Vol. 104. – P. 24–31. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.04.066.
18. Arnold J., Gustin M.S., Weisberg P.J. Evidence for nonstomatal uptake of Hg by aspen and translocation of Hg from foliage to tree rings in Austrian Pine // Environmental Science Technology. – 2018. – Vol. 52. – P. 1174–1182. DOI: 10.1021/acs.est.7b04468.
19. United Nations Environment Programme. Chemicals and Health Branch Geneva, 2019. URL: <https://www.unep.org/resources/global-environment-outlook-6> (дата обращения 15.11.2024).
20. A new mechanism for atmospheric mercury redox chemistry: implications for the global mercury budget / H.M. Horowitz, D.J. Jacob, Y. Zhang, T.S. Dibble // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2017. – Vol. 17. – P. 6353–6371. DOI: 10.5194/acp-17-6353-2017.
21. Mercury from wildfires: global emission inventories and sensitivity to 2000–2050 global change / A. Kumar, W. Shiliang, Y. Huang, L. Hong, J.O. Kaplan // Atmospheric Environment. – 2018. – Vol. 173. – P. 6–15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.10.061>.
22. Updated global and oceanic mercury budgets for the United Nations global mercury assessment / P.M. Outridge, R.P. Mason, F. Wang, S. Guerrero, L.E. Heimbürger-Boavida // Environmental Science & Technology. – 2018. – Vol. 52. – P. 11466–11477. DOI: 10.1021/acs.est.8b01246.

23. Ahn Y.S., Jung R., Moon J.H. Approaches to understand historical changes of mercury in tree rings of Japanese Cypress in industrial areas // *Forests*. – 2020. – Vol. 11 (8). – P. 800. DOI: <https://doi.org/10.3390/f11080800>.
24. Vegetation uptake of mercury and impacts on global cycling / J. Zhou, D. Obrist, A. Dastoor, M. Jiskra, A.B. Ryzhkov // *Nature Reviews Earth & Environment*. – 2021. – Vol. 2 (4) – P. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00146-y>
25. Tatzber M., Fürst A. Mercury in tree rings close to emission sources in Austria // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2023. – Vol. 30 (8). – P. 86084–86096. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28251-z>.
26. Terrestrial mercury and methylmercury bioaccumulation and trophic transfer in subtropical urban forest food webs / F. Zhang, Z. Xu, X. Xu, L. Liang, Z. Chen, X. Dong, K. Luo, F. Dinis, G. Qiu // *Chemosphere*. – 2022. – Vol. 299. – P. 134424. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2022.134424](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134424).
27. Добровольский В.В. Основы биогеохимии. – М.: Академия, 2003. – 400 с.
28. Лунина О.В., Гладков А.С., Гладков А.А. Систематизация активных разломов для оценки сейсмической опасности // *Тихоокеанский геология*. – 2012. – Т. 31. – № 1. – С. 49–60.
29. 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](https://doi.org/10.18412/1816-0395-2018-12-56-62).
30. Машьянов Н.Р. Проблемы экологической безопасности // *Токсичные металлы, "Минерал"*. – 1999. – № 1. – С. 5–64.
31. Measurements and distribution of atmospheric particulate-bound mercury: a review / H. Zhang, X.W. Fu, X. Wang, X.B. Feng // *Bull Environ Contam Toxicol*. – 2019. – Vol. 103. – P. 48–54. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00128-019-02663-5>.
32. Individual tree diameter growth modeling system for Dalat pine (*Pinus dalatensis* Ferré) of the upland mixed tropical forests / B. Huy, L.C. Nam, K.P. Poudel, H. Temesgen // *Forest Ecology and Management*. – 2020. – Vol. 480. – P. 1–15. DOI: [10.1016/j.foreco.2020.118612](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118612).
33. IUCN, 2019. The IUCN Red list of Threatened Species. URL: <https://www.iucnredlist.org/> (дата обращения 01.12.2024).
34. Contrasting tree ring Hg records in two conifer species: Multi-site evidence of species-specific radial translocation effects in Scots pine versus European larch / T. Novakova, T. Navratil, J.D. Demers, M. Roll, J. Rohovec // *The Science of The Total Environment*. – 2021. – Vol. 762. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144022>.
35. Świątek B., Kraj W., Pietrzykowski M. Adaptation of *Betula pendula* Roth., *Pinus sylvestris* L., and *Larix decidua* Mill. to environmental stress caused by tailings waste highly contaminated by trace elements // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2024. – Vol. 196. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-023-12134-4>.
36. Евсеева Н.С. География Томской области. (Природные условия и ресурсы). – Томск: Изд-во Томского университета, 2001. – 223 с.
37. Реконструкция радиационной обстановки на территории Томской области по стратифицированным природным образованиям / Л.П. Рихванов, Ю.Л. Замятина, А.М. Межибор, Т.А. Архангельская, А.Ю. Иванов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2011. – Т. 319. – № 1. – С. 199–203.
38. Таловская А.В. Экогеохимия атмосферных аэрозолей на урбанизированных территориях юга Сибири: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Томск, 2022. – 170 с.
39. Язиков Е.Г. Разработка методологии комплексной эколого-геохимической оценки состояния природной среды (на примере объектов юга Западной Сибири) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2001. – Т. 304. – № 1. – С. 325–336.
40. Экология Северного промышленного узла г. Томска. Проблемы и решения / А.М. Адам, Л.П. Рихванов, С.В. Нарзулаев и др. / под ред. А.М. Адама. – Томск: Изд-во ТГУ, 1994. – 260 с.
41. Летувнинкас А.И., Строителей А.Д., Квасников А.В. Геохимические аспекты состояния природной среды в районе Туганского титан-циркониевого месторождения // *Основные проблемы охраны геологической среды (информационные материалы)*. – Томск: Томский гос. ун-т, 1995. – С. 93–99.
42. Туганское комплексное месторождение в Томской области / А.И. Летувнинкас., В.Г. Бирюков, А.Д. Строителей, Н.С. Москвитина, Н.Ю. Ахмадшин, Т.А. Семина // *Рудные месторождения. Минералогия. Геохимия*. – Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2000. – С. 139–178.
43. Повышенные содержания ртути в воде истока реки Ангара: отклики на геодинамические воздействия и сильные землетрясения / В.И. Гребенщикова, М.И. Кузьмин, А.В. Ключевский, В.М. Демьянович, А.А. Ключевская // *Доклады российской академии наук. Науки о земле*. – 2020. – Т. 491. – № 2. – С. 77–81.
44. Гидрохимические характеристики поверхностного стока озера Байкал (1997–2003) / П.В. Коваль, Ю.Н. Удодов, Л.Д. Андрулайтис, А.Е. Гапон, О.А. Склярова, С.Е. Чернигова // *Доклады российской академии наук*. – 2005. – Т. 401. – № 5. – С. 663–667.
45. Государственный доклад «О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2022 году». – Иркутск: ФГБУН Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2023. – 372 с.
46. Антропогенная компонента и баланс ртути в экосистеме Братского водохранилища / П.В. Коваль, Г.В. Калмычков, С.М. Лавров, Ю.Н. Удодов, Е.В. Бутаков, Ф.В. Файфилд, В.И. Алиева // *Доклады Академии наук*. – 2003. – Т. 388. – № 5. – С. 225–227.
47. Ефимова Н.В., Лисецкая Л.Г. Содержание ртути в биосубстратах населения Иркутской области // *Токсикологический вестник*. – 2007. – № 3. – С. 11–15.
48. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды Республики Бурятия в 2023 году». – Улан-Удэ: Министерство природных ресурсов и экологии Республики Бурятия, 2024. – 384 с.
49. Nguyen L.S.P., Hien T.T. Long-range atmospheric mercury transport from across East Asia to a suburban coastal area in Southern Vietnam // *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. – 2024. – Vol. 112. – P. 1033–1039. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00128-023-03842-1>

50. Atmospheric particulate-bound mercury (PBM10) in a Southeast Asia megacity: sources and health risk assessment / L.S.P. Nguyen, T.T. Hien, M.T. Truong, N.D.T. Chi, G.R. Sheu // *Chemosphere*. – 2022. – Vol. 307. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135707>.
51. UN Environment (2019) Global mercury assessment 2018. UN Environment Programme, Chemicals and health branch. – Geneva, Switzerland. URL: <https://www.unep.org/resources/publication/global-mercury-assessment-2018> (дата обращения 01.12.2024).
52. Characteristics of total gaseous mercury at a tropical megacity in Vietnam and influence of tropical cyclones / L.S.P. Nguyen, T.D.H. Pham, M.T. Truong, A.N. Tran // *Atmospheric Pollution Research*. – 2023. – Vol. 14 (8). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2023.101813>.
53. Методы дендрохронологии / С.Г. Шиятов, Е.А. Ваганов, А.В. Кирдянов, В.Б. Круглов, В.С. Мазепа, М.М. Наурзбаев, Р.М. Хантемиров. – Красноярск: КрасГУ, 2000. – 80 с.
54. Томская область в предвоенные, военные годы и послевоенное восстановление: Юб. стат. сб. Томскстат. – Томск, 2020. – 105 с.
55. Забелина А.А., Полтинина Е.В. Память о великом подвиге: «цифры и факты». – Иркутск: Иркутскстат, 2020. – 50 с.
56. Nguyễn Kim Hoàng. Phân vùng sinh khoáng và triển vọng, Tạp chí phát triển KH&CN, tập 16, số M2 – 2013, tr 85–96.
57. The effects of herbicides in South Vietnam, Part A – summary and conclusions. Special collections, USDA National Agricultural Library. National Academy of Sciences (NAS) – 1974. DOI: <https://www.nal.usda.gov/exhibits/speccoll/items/show/1318>.
58. Multi-decadal decline of mercury in the North Atlantic atmosphere explained by changing subsurface seawater concentrations / A.L. Soerensen, D.J. Jacob, D.G. Streets, M.L.I. Witt, R. Ebinghaus, R.P. Mason, M. Bernander, E.M. Sunderland // *Geophysical Research Letters*. – 2012. – Vol. 39. DOI: 10.1029/2012GL053736.
59. United Nations Environment Programme. Global Mercury Assessment 2013: Sources, Emissions, Releases and Environmental Transport. – 2013. DOI: <http://unep.org/hazardoussubstances/>.

Информация об авторах

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>

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. nata@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3729-800X>

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>

Мария Германовна Крачнакова, магистрант 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>

Поступила в редакцию: 16.12.2024

Поступила после рецензирования: 13.01.2025

Принята к публикации: 03.02.2025

REFERENCES

1. Rikhvanov L.P., Yusupov D.V., Tursunaliyeva E.M., Pavlova A.A., Lyapina E.E. Mercury emanations from the Baikal rift: evidence from the study of annual tree rings (an example of the Tunka Depression). *Doklady Earth Sciences*, 2021, vol. 496, no. 1, pp. 32–36. (In Russ.)
2. Chernenkaya E.V. *Dynamics of changes in the elemental composition of the natural environment according to the data of herbarium and modern collections of plants in the south of Siberia*. Cand. Dis. Tomsk, 2016. 262 p. (In Russ.)
3. Yusupov D.V., Lyapina E.E., Tursunaliyeva E.M. Poplar tree (*Populus Balsamifera* L.) as indicator of mercury emission from a point source. *Chemosphere*, 2022, vol. 287, pp. 132–157. DOI: doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132157.
4. Tursunaliyeva E.M. *Ecogeochemistry of mercury in woody plants of the poplar genus (leaves and annual rings) of urbanized areas of Siberia and the Far East*. Cand. Dis. Tomsk, 2022. 140 p. (In Russ.)
5. Yusupov D.V. *Methodology for biogeochemical indication of urban and mining areas based on the analysis of woody vegetation*. Dr. Diss. Tomsk, 2022. 344 p. (In Russ.)
6. Lyapina E.E. *Ecogeochemistry of mercury in natural environments of the Tomsk region*. Cand. Dis. Tomsk, 2012. 154 p. (In Russ.)
7. Lyapina E.E. Ecological and geochemical features of mercury accumulation in coniferous wood in the Altai Region. *Forestry Engineering Journal*, 2023, vol. 13, no. 4 (52), P. 2, pp. 95–109 (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/19>.
8. Lyapina E.E., Le Thi Hong Sang, Krachnakova M.G., Baranovskaya N.V., Markelova A.N., Zolotov S.Yu. Dendrogeochemistry of Hg according to the study of Scots pine (*Pinus Sylvestris* L.) in the Tomsk region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Asset Engineering*, 2024, vol. 335, no. 8, pp. 125–136. (In Russ.)

9. 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.)
10. Xu C., Zhao Y., An W. Method to measure tree-ring width, density, elemental composition, and stable carbon and oxygen isotopes using one sample. *J. For. Res.* 2024, vol. 35, no. 56. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11676-024-01707-9>
11. Lepp N.W. The potential on tree-ring analysis for monitoring heavy metal pollution patterns. *Environ Pollut*, 1975, vol. 9, pp. 49–61.
12. Cutter B.E., Guyette R.P. Anatomical, Chemical, and ecological factors affecting tree species choice in dendrochemistry studies. *J. Environ. Qual.*, 1993, vol. 22, pp. 611–619.
13. Watmough S.A. Monitoring historical changes in soil and atmospheric trace metal levels by dendrochemical analysis. *Environ Pollut.*, 1999 Sep, vol. 106 (3), pp. 391–403. DOI: 10.1016/s0269-7491(99)00102-5. PMID: 15093035.
14. Watmough S.A., Hutchinson T.C. Historical changes in lead concentrations in tree-rings of sycamore, oak and Scots pine in north-west England. *Science of the Total Environment*, 2002, vol. 293 (1–3), pp. 85–96.
15. Watmough S.A., Hutchinson T.C. Uptake of 207Pb and 111Cd through bark of mature sugar maple, white ash and white pine: a field experiment. *Environmental Pollution*, 2003, vol. 121 (1), pp. 39–48.
16. 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.
17. 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.
18. Arnold J., Gustin M.S., Weisberg P.J. Evidence for nonstomatal uptake of Hg by aspen and translocation of Hg from foliage to tree rings in Austrian Pine. *Environ. Sci. Technol.*, 2018, vol. 52, pp. 1174–1182.
19. Programme U.N.E. (*United Nations Environment Programme, Chemicals and Health Branch*). Geneva, 2019. Available at: <https://www.unep.org/resources/global-environment-outlook-6> (accessed 15 November 2024).
20. Horowitz H.M. A new mechanism for atmospheric mercury redox chemistry: implications for the global mercury budget. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, vol. 17, pp. 6353–6371. DOI: 10.5194/acp-17-6353-2017.
21. Kumar A., Wu S., Huang Y., Liao H., Kaplan J.O. Mercury from wildfires: global emission inventories and sensitivity to 2000–2050 global change. *Atmos Environ*, 2018, vol. 173, pp. 6–15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.10.061>
22. Outridge P.M., Mason R.P., Wang F., Guerrero S., Heimbürger-Boavida L.E. Updated global and oceanic mercury budgets for the United Nations global mercury assessment 2018. *Environmental Science & Technology*, 2018, vol. 52, pp. 11466–11477. DOI: 10.1021/acs.est.8b01246 (Q).
23. Ahn Young Sang, Raae Jung, Jae-Hyun Moon. Approaches to understand historical changes of mercury in tree rings of Japanese Cypress in industrial areas. *Forests*, 2020, vol. 11, no. 8, pp. 800. DOI: <https://doi.org/10.3390/f11080800>
24. Zhou J., Obrist, D., Dastoor A. Vegetation uptake of mercury and impacts on global cycling. *Nat Rev Earth Environ*, 2021, vol. 2, pp. 269–284. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00146-y>
25. Tatzber M., Fürst A. Mercury in tree rings close to emission sources in Austria. *Environ Sci Pollut Res*, 2023, vol. 30, pp. 86084–86096. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28251-z>
26. Zhang F., Xu Z., Xu X. Terrestrial mercury and methylmercury bioaccumulation and trophic transfer in subtropical urban forest food webs. *Chemosphere*, 2022, vol. 299, 134424. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134424.
27. Dobrovolskiy V.V. *Fundamentals of biogeochemistry*. Moscow, Akademiya Publ., 2003. 400 p. (In Russ.)
28. Lunina O.V., Gladkov A.S., Gladkov A.A. Systematization of active faults for seismic hazard estimation. *Pacific Geology*, 2012, vol. 31, no. 1, pp. 49–60. (In Russ.)
29. Yusupov D., Rikhvanov L., Robertus Yu., Lyapina E., Tursunaliyeva E., Baranovskaya N., Osipova N. Mercury in poplar leaves in the urbanized areas of Southern Siberia and the Far East. *Ecology and Industry of Russia*, 2018, vol. 22 (12), pp. 56–62. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2018-12-56-62>
30. Mashjanov N.R. Problems of environmental safety. *Toxic metals, “Mineral”*, 1999, vol. 1, pp. 5–64. (In Russ.)
31. Zhang H., Fu X.W., Wang X., Feng X.B. Measurements and distribution of atmospheric particulate-bound mercury: a review. *Bull Environ Contam Toxicol*, 2019, vol. 103, pp. 48–54. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00128-019-02663-5>
32. Huy B., Canh Nam L., Poudel K.P., Temesgen H. Individual tree diameter growth modeling system for Dalat pine (*Pinus dalatensis* Ferré) of the upland mixed tropical forests. *For. Ecol. Manag.*, 2021, vol. 480, Article 118612. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.118612
33. IUCN, 2019. *The IUCN Red list of Threatened Species*. Available at <https://www.iucnredlist.org/> (accessed 1 December 2024).
34. Nováková T., Navrátil T., Demers J.D., Roll M., Rohovec J. Contrasting tree ring Hg records in two conifer species: Multi-site evidence of species-specific radial translocation effects in Scots pine versus European larch. *Sci. Total Environ.*, 2021, vol. 762, 144022, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144022>
35. Świątek B., Kra W., Pietrzykowski M. Adaptation of *Betula pendula* Roth., *Pinus sylvestris* L., and *Larix decidua* Mill. to environmental stress caused by tailings waste highly contaminated by trace elements. *Environ Monit Assess*, 2024, vol. 196, vol. 52. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-023-12134-4>
36. Evseeva N.S. *Geography of the Tomsk Region. (Natural conditions and resources)*. Tomsk, Tomsk University Publ., 2001. 223 p. (In Russ.)
37. Rikhvanov L.P., Zamyatina Yu.L., Mezhibor A.M., Arkhangelskaya T.A., Ivanov A.Yu. Reconstruction of the radiation situation on the territory of the Tomsk region according to stratified natural formations. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 319, no. 1, pp. 199–203. (In Russ.)
38. Talovskaya A.V. *Ecogeochemistry of atmospheric aerosols in urbanized territories of southern Siberia*. Cand. Dis. Tomsk, 2022. 170 p. (In Russ.)

39. Yazikov E.G. Development of the methodology of complex ecological and geochemical assessment of the state of the natural environment (on the example of objects of the south of Western Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2001, vol. 304, no. 1, pp. 325–336.
40. *Ecology of the Northern Industrial Hub of Tomsk. Problems and Solutions*. Ed. by A.M. Adam. Tomsk, TSU Publ., 1994. 260 p. (In Russ.)
41. Letuvninkas A.I., Stroitelev A.D., Kvasnikov A.V. *Geochemical aspects of the state of the natural environment in the area of the Tugansk titanium-zirconium deposit*. Tomsk, Tomsk State University Publ., 1995. pp. 93–99.
42. Letuvninkas A.I., Biryukov V.G., Stroitelev A.D. Tugansk complex field in Tomsk region. *Ore deposits. Mineralogy. Geochemistry: Collection of Articles*. Tomsk, National Research Tomsk State University, 2000. pp. 139–178. (In Russ.)
43. Grebenshchikova V.I., Kuzmin M.I., Klyuchevskii A.V., Demyanovich V.M., Kluchevskaya A.A. Elevated mercury in the water source of the Angara river source: A response to geodynamic impacts and severe earthquakes. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Earth Sciences*, 2020, vol. 491, no. 2, pp. 77–81. (In Russ.)
44. Koval P.V., Udodov Yu.N., Andrulaitis L.D., Gapon A.E., Sklyarova O.A., Chernigova S.E. Hydrochemical characteristics of the surface runoff of Lake Baikal (1997–2003). *DAN*, 2005, vol. 401, no. 5, pp. 663–667. (In Russ.)
45. *State report "On the state of Lake Baikal and measures for its protection in 2022"*. Irkutsk, V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS Publ., 2023. 372 p. (In Russ.)
46. Koval P.V., Kalmychikov G.V., Udodov Yu.N. Anthropogenic component and mercury balance in ecosystem of the Bratsk hydropower reservoir. *Doklady Earth Sciences*, 2003, vol. 388, no. 1, pp. 60–62. (In Russ.)
47. Yefimova N.V., Lisetskaya L.G. Concentration of mercury in biosubstrates of the population of the Irkutsk Region. *Toxicological Review*, 2007, vol. 3, pp. 11–15. (In Russ.)
48. *State report "On the state and protection of the environment of the Republic of Buryatia in 2023"*. Ulan-Ude, Ministry of Natural Resources and Ecology of the Republic of Buryatia Publ., 2024. 384 p. (In Russ.)
49. Nguyen L.S.P., Hien T.T. Long-range atmospheric mercury transport from across East Asia to a suburban coastal area in Southern Vietnam. *Bull Environ Contam Toxicol*, 2024, vol. 112, no. 14. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00128-023-03842-1>
50. Nguyen L.S.P., Hien T.T., Truong M.T., Chi N.D.T., Sheu G.R. Atmospheric particulate-bound mercury (PBM10) in a Southeast Asia megacity: sources and health risk assessment. *Chemosphere*, 2022, vol. 307, 135707. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135707>
51. *UN Environment (2019) Global mercury assessment 2018. UN Environment Programme, Chemicals and health branch*. Geneva, Switzerland. Available at: <https://www.unep.org/resources/publication/global-mercury-assessment-2018> (accessed 1 December 2024).
52. Nguyen L.S.P., Pham T.D.H., Truong M.T., Tran An. Characteristics of total gaseous mercury at a tropical megacity in Vietnam and influence of tropical cyclones. *Atmos Pollut Res*, 2023, vol. 14 (8), 101813. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2023.101813>
53. Shiyatov S.G., Vaganov E.A., Kirdyanov A.V., Kruglov V.B., Mazepa V.S., Naurzbaev M.M., Khantemirov R.M. *Methods of dendrochronology*. Krasnoyarsk, KrasGU Publ., 2000. 80 p. (In Russ.)
54. *Tomsk region in the pre-war, war years and post-war reconstruction*. Tomskstat, Tomsk, 2020. 105 p. (In Russ.)
55. Zabelina A. A., Poltina E.V. *Memory of the great feat: "figures and facts"*. Irkutsk, Irkutskstat Publ., 2020. 50 p. (In Russ.)
56. Nguyen Kim Hoang. Gold metallogenic zoning and mineralized prospect in Dalat zone. *Science & Technology Development*, 2013, vol. 16, no. M2, pp. 85–96. (In Vietnamese).
57. *National Academy of Sciences. Report: The Effects of herbicides in South Vietnam, Part A – summary and conclusions*. Special Collections, USDA National Agricultural Library. 1974. DOI: <https://www.nal.usda.gov/exhibits/speccoll/items/show/1318>
58. Soerensen A.L., Jacob D.J., Streets D.G., Witt M.L.I., Ebinghaus R., Mason R.P., Andersson M., Sunderland E.M. Multi-decadal decline of mercury in the North Atlantic atmosphere explained by changing subsurface seawater concentrations. *Geophys. Res. Lett.*, 2012, vol. 39, L21810. DOI: [10.1029/2012GL053736](https://doi.org/10.1029/2012GL053736).
59. *United Nations Environment Programme. Global Mercury Assessment 2013: Sources, Emissions, Releases and Environmental Transport*. 2013. DOI: <http://unep.org/hazardoussubstances/>.

Information about the authors

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

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

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

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

Received: 16.12.2024

Revised: 13.01.2025

Accepted: 03.02.2025