

УДК 550.47  
DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4373  
Шифр специальности ВАК: 1.6.21

## Эколого-геохимические особенности ртутной нагрузки на территорию юга Западной Сибири

Е.В. Перегудина<sup>1✉</sup>, Е.Е. Ляпина<sup>2</sup>, Н.В. Барановская<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

<sup>2</sup> Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Россия, г. Томск

✉ pere-elena@mail.ru

### Аннотация

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью изучения вклада биогенных факторов в миграцию элементов и ответа эколого-геохимической системы на природно-техногенную ситуацию, что позволяет выявлять наличие биогеохимических аномалий, а также определять естественный региональный фон ртути в природных объектах. **Цель:** определение эколого-геохимических особенностей ртутной нагрузки на территории юга Западной Сибири (Томская область, Кемеровская область, Алтайский край) по данным исследования (листья осины обыкновенной (*Populus tremula* L.)). **Объекты.** Листья осины обыкновенной (*Populus tremula* L.), широко используемые для анализа биогеохимического круговорота химических элементов и их миграции в системе «почва–растение», отражают элементный состав среды произрастания и могут выступать в качестве биоиндикатора для проведения биогеохимических исследований. **Методы:** отбор проб листьев осины, высушивание при комнатной температуре, измельчение, атомно-абсорбционный анализ ртути на анализаторе «РА-915М» с приставкой «ПИРО-915+» (метод пиролиза). Статистическая обработка результатов выполнена с использованием программного пакета Statistica; расчет эколого-геохимических показателей включал: коэффициент концентрации, фактор обогащения, коэффициент биоаккумуляции, кларк концентрации. **Результаты.** Приводятся оригинальные данные о валовой концентрации Hg в листьях осины на территории Томской, Кемеровской областей и Алтайского края. Выявлены особенности накопления поллютанта в зависимости от района произрастания, географии и орографии территории, геохимических особенностей районов исследования, влияния антропогенных факторов. Выполнены расчёты основных геоэкологических показателей ртутной нагрузки. Результаты расчетов свидетельствуют о превышении концентраций относительно фона, кларка ноосферы и среднего для сухого вещества наземных растений. В субстрате выявлено присутствие элемента в доступной для растений форме, о чем свидетельствуют результаты расчета коэффициента биоаккумуляции. Территориально накопление Hg листвой осины на территории юга Западной Сибири связано с преобладающим направлением ветра, воздействием антропогенных источников.

**Ключевые слова:** Hg, листья осины, почва, Томская область, Кемеровская область, Алтайский край.

**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:** Перегудина Е.В., Ляпина Е.Е., Барановская Н.В. Эколого-геохимические особенности ртутной нагрузки на территорию юга Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 12. – С. 65–75. DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4373

---

UDC 550.47

DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4373

## Ecological and geochemical features of mercury load on the territory of south of Western Siberia

E.V. Peregudina<sup>1✉</sup>, E.E. Lyapina<sup>2</sup>, N.V. Baranovskaya<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

<sup>2</sup> Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,  
Tomsk, Russian Federation

✉ pere-elena@mail.ru

### Abstract

**Relevance.** The need to study contribution of biogenic factors to migration of elements and response of ecological and geochemical system to natural and technogenic situation, which makes it possible to identify the presence of biogeochemical anomalies. **Aim.** To determine ecological and geochemical features of mercury load in the south of Western Siberia (Tomsk region, Kemerovo region, Altai territory) according to research (leaves of aspen (*Populus tremula* L., family Salicaceae)). **Objects.** Aspen leaves, widely used to analyze the biogeochemical cycle of chemical elements and their migration in the "soil-plant" system, reflect the elemental composition of growing environment and can act as a biogeoindicator for biogeochemical studies. **Methods.** Sampling of aspen leaves, drying at room temperature, grinding, atomic absorption analysis of mercury on an RA-915M analyzer with the PIRO-915+attachment (pyrolysis method). The application program STATISTICA 12 was used to process the data analysis and calculate eco-geochemical indicators: concentration factor, enrichment factor, bioaccumulation factor, concentration clarke. **Results.** The article presents original data on Hg gross concentration in aspen leaves in Tomsk, Kemerovo regions and Altai Territory. The authors have revealed the features of pollutant accumulation depending on the area of growth, geography and orography of the territory, geochemical features of the study areas, and the influence of anthropogenic factors. Calculations of the main geo-environmental indicators of the mercury load were made. The calculation results indicate that the concentrations are higher than the background, the Clarke of the noosphere, and the average for the dry matter of terrestrial plants. The presence of the element in the form available to plants was revealed in the substrate, as evidenced by the results of calculating the bioaccumulation coefficient. Geographically, Hg accumulation in aspen leaves in the south of Western Siberia is associated with the prevailing wind direction and the impact of anthropogenic sources.

**Keywords:** Hg, aspen leaves, soil, Tomsk region, Kemerovo region, Altai region.

**Acknowledgements:** The research was carried out as part of a 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:** Peregudina E.V., Lyapina E.E., Baranovskaya N.V. Ecological and geochemical features of mercury load on the territory of south of Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 12, pp. 65–75. DOI: 10.18799/24131830/2023/12/4373

### Введение

Хвоя, эпифитные виды лишайников, листья тополя и осины являются самыми популярными и часто используемыми для биомониторинга и биогеоиндикации представителями растительности как в России, так и за рубежом. Они удобны и информативны в качестве биогеоиндикаторов экологического состояния атмосферного воздуха. Данные представители диагностики состояния компонентов окружающей среды отличаются широким ореолом произрастания, многообразием видов, простотой сбора, пробоподготовки и анализа. Данные, полученные методами биогеоиндикации, позволяют точно оценить качество приземной атмосферы как

за один вегетационный период, так и до 5 лет. Кроме того, хвойная и лиственная подстилка участвует в формировании почвенного покрова, а накопленные в ней химические элементы вносят вклад в формирование химического состава почвы, поверхностных и подземных вод [1]. Растения также способны выделять накопленную ртуть (Hg) обратно в атмосферу в процессе дыхания [2, 3].

Объектом исследования послужили листья осины обыкновенной или тополя дрожащего (*Populus tremula* L.) (далее осина) как наиболее распространенного вида лиственных пород деревьев на территории Сибирского региона. Интерес к данному объекту исследования вызван не только его широ-

кой распространённостью на данной территории, но также применением для разработки лекарственных препаратов в качестве противовоспалительных, противоревматических, обезболивающих средств. Почти все части осины – листья, почки, кора – используются в народной медицине. Но главное свойство осины – антибактериальный эффект, который обусловлен содержанием в ней горьких гликозидов, бензоатов, фенольных соединений. Эти биологически активные вещества действуют губительно на опасных микробов, блокируя их жизнедеятельность [4–7].

Осина является концентратором тяжелых металлов. Благодаря высокой поглотительной способности и быстрой скорости роста осина рекомендуется для создания санитарно-защитных зон техногенных ландшафтов [8]. По данным зарубежной литературы, некоторые породы деревьев обладают большим потенциалом практического применения в фиторемедиации [9, 10].

Исследователями установлено, что листья и ветки осины в сравнении с хвоей и ветками сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), листьями березы повислой (*Betula pendula* 'Fastigiata'), листьями и корнями красного клена (*Acer rubrum*) характеризуются повышенным накоплением некоторых химических элементов (Co, Hg, Zn, Ni, Cd) [10–13]. Следует отметить, что в литературных источниках часто встречаются данные по содержанию Ni, Zn, K, Ca, Cu, Mn, Mg, Pb, Fe, Ti, Sr, Cd и др. [9, 14–18]. В исследованиях, посвященных определению содержания Hg в листьях осины, приводятся данные по валовому содержанию поллютанта, формам нахождения, испарению с листовой пластины и поступлению в другие части дерева через корневую систему и листву [19–23]. Однако в целом данных крайне мало.

Hg – крайне токсична, патогенна, относится к группе тиоловых ядов, элемент I класса опасности, признана одним из самых опасных загрязнителей окружающей среды. И поэтому жестко нормируется в ее компонентах [24]. В процессе миграции метилирует с образованием высокотоксичных соединений [25]. Основной путь миграции Hg в окружающей среде – атмосферный перенос [22].

Цель работы – определение эколого-геохимических особенностей ртутной нагрузки на территории юга Западной Сибири (Томская область, Кемеровская область, Алтайский край) по данным исследования листьев осины обыкновенной (*Populus tremula* L.).

#### **Объекты и методы исследования**

Отбор проб листьев осины на территории Томской области (ТО) проводился в районах: Бакчарский (24 пробы), Колпашевский (10 проб), Криво-

шеинский (10 проб), Молчановский (10 проб), Чаинский (30 проб) и Шегарский (10 проб) в период с 2018 по 2020 гг. Геоэкологическая обстановка на территории Томской области складывается из комплекса факторов, влияющих непосредственно на окружающую среду, таких как физико-географические условия и деятельность различных промышленных предприятий. Топливная, нефтегазодобывающая, химическая, нефтехимическая и лесная промышленность, машиностроение, сельское хозяйство, ядерно-топливный цикл являются ключевыми отраслями области, а также автотранспорт, количество которого увеличивается из года в год [26]. Немаловажное влияние на экологию региона оказывают районы падения отделяющихся частей ракет-носителей, расположенных на территории Кургасокского, Парабельского, Колпашевского и Верхнекетского районов; зона воздействия Сибирского химического комбината и места захоронения радиоактивных отходов; район водозабора в Обь-Томском междуречье; северный промышленный узел г. Томска; районы интенсивных лесозаготовок и лесных пожаров [27].

На территории Кемеровской области (КО) пробы листьев осины отбирали в конце лета 2022 г. в Таштагольском районе, вблизи населенных пунктов Мундыбаш, Темиртау, Каз и Таштагол. Южная часть Кемеровской области образует обособленную геоморфологическую структуру, так называемую Горную Шорию, где сходятся в сложный горный узел хребты Северо-Восточного Алтая, Кузнецкого Алатау и Салаирского кряжа. Кемеровская область является горнопромышленным регионом, именно в Кузбассе добывается более половины каменного угля от общей российской добычи. Территория исследования от Мундыбаша до Таштагола характеризуется деятельностью горнодобывающей промышленности: железорудные месторождения, золотодобывающие рудники, добыча нерудного сырья. Итогом деятельности горнодобывающих предприятий является образование огромного количества отходов: золоотвалы теплоэлектростанций; отвалы доменных и сталеплавильных шлаков, отходы добычи железной руды и других отходов металлургии; отходы химической промышленности. Эколого-экономический ущерб от нарушения земель выражается в деградации почвенно-растительного покрова [28].

На территории Алтайского края (АК) пробы листьев осины отбирали с севера на юг вдоль границы с Республикой Казахстан в период с 2016 по 2022 гг. в Хабаровском (12 проб), Ключевском (12 проб), Михайловском районах (12 проб), а также муниципальном округе Славгород (12 проб). В каждом районе было отобрано по 12 проб листьев осины. Район исследования расположен в преде-

лах Кулундинской равнины. Рельеф местности равнинный. Точки отбора проб окружены полями. Алтайский край является крупным аграрным регионом России, на территории которого традиционно производится зерно, молоко, мясо, выращивается сахарная свёкла, подсолнечник, лён масличный, лён-долгунец, хмель, рапс, соя и др. [29]. Среди источников антропогенной нагрузки на территории исследования следует отметить деятельность ОАО «Алтайхимпром» (г. Яровое, объект включен в государственный реестр объектов накопленного вреда Минприроды России) [30], крупные автомобильные и железные дороги (близкое расположение полей) и населенные пункты (отсутствие централизованной системы водоотведения, свалки), а также многолетнее внесение удобрений, фунгицидов и гербицидов (в том числе гранозана). Существенный вклад в поступление Hg может вносить трансграничный перенос со стороны сопредельного государства (Республика Казахстан: ТОО «ХИМПРОМ 2011» г. Павлодар, Семипалатинский испытательный полигон) [30–32].

В каждой точке наблюдения отбирались листья осины методом средней пробы, без черешков. Возраст деревьев примерно одинаковый, с внешней стороны нижней части кроны, по окружности на высоте 1,5–2 м от поверхности земли; масса одной пробы составляла 100 г сырого вещества. Все пробы отбирались согласно [33]. Пробы листьев осины отбирали на территориях, не испытывающих непосредственной антропогенной нагрузки.

Отобранные пробы листьев сушили до воздушно-сухого состояния, упаковывали в бумажные конверты и хранили в сухом прохладном месте. Всего отобрано 190 проб листьев осины в 54 точках: 94 пробы – на территории ТО, 48 – КО, 48 – АК.

Для основной массы отобранных проб влажная очистка не проводилась для сохранения пылевой составляющей. Для выявления влияния осадков на накопление поллютанта часть проб отмывали дистиллированной водой. Методические работы проводились на условно фоновой территории СНТ Пчелка (20 км к югу от города Томска). Пробы листьев осины отбирались в течение вегетационного периода на одной точке (с начала июня по конец августа) каждую неделю с равным промежутком времени. Перед высушиванием проба листьев делилась на две части, одна часть пробы сразу сушилась, вторая часть отмывалась для удаления элементов, осаждающихся на поверхности листа по методике [33], затем сушилась при комнатной температуре до постоянной массы образца, измельчалась и анализировалась. В эксперименте по выявлению влияния осадков на накопление поллютанта использовали 39 проб листьев; по накоплению Hg в течение вегетационного периода – также 39 проб.

Пробы почвы отбирали на тех же точках, что и пробы растительности в соответствии с ГОСТ [34], а также методическими наработками коллектива ИМГРЭ методом «конверта» из пяти точек, глубина отбора 0–20 см в зоне расположения основной части корневой системы [35]. Пробоподготовка включала предварительное высушивание почвы, удаление сторонних включений, просеивание на сите диаметром 1 мм, истирание до состояния «пудры» в виброистирателе. Количество проб почвы соответствует числу проб листьев.

Почвы Томской области представлены светло-серыми и серыми лесными почвами, дерново-глебовыми почвами террас р. Томи и Оби, а также болотно-подзолистыми, лугово-черноземными, серыми лесными с глеевыми почвами [36].

Почвы Кемеровской области представлены в основном тяжелыми суглинками, дерновыми и лесными светло-серыми почвами, бурными горно-таежными, также встречаются серые лесные: луговые и лугово-болотные почвы [37].

Почвы Алтайского края характеризуются как южные черноземы, каштановые и темно-каштановые почвы, а также лугово-каштановые солонцеватые и солончаковые, залегающие на среднесуглинистых почвообразующих породах [29].

Содержание Hg в пробах определяли методом атомной абсорбции на анализаторе Hg РА-915+ с помощью приставки ПИРО-915 (метод пиролиза; 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 НИ ТПУ [38].

Методика обработки результатов включала расчет эколого-геохимических показателей для проб листьев осины:  $K_c$  – коэффициента концентрации относительно фона, приведенного в литературных источниках (8 нг/г) [39]; ВДК – временно-допустимой концентрации (16 нг/г) [39];  $K_{LM}$  – кларка живого вещества (100 нг/г); [6];  $K_N$  – ноосферы (180 нг/г) [40];  $K_{LP}$  – среднего содержания в сухом веществе наземных растений (15 нг/г) [41];  $K_M$  – среднего арифметического по выборке (21,6±5,3 нг/г – ТО; 14,4±3,5 нг/г – КО; 10,8±2,5 нг/г – АК);  $K_E$  – фактора обогащения (нормирование по  $S_c$ , собственные данные);  $K_B$  – коэффициента биоаккумуляции [4].

Для проб почвы:  $K_c$  – коэффициента концентрации относительно фона (31 нг/г, собственные данные);  $K_{пдк}$  – относительно ПДК (2100 нг) [39];  $K_k$  – кларка концентрации (65 нг/г) [42];  $K_M$  – среднего арифметического по выборке (21,4±3,5 нг/г – ТО; 68,5±14,2 нг/г – КО; 6,3±3,6 нг/г – АК);  $K_E$  – фактора обогащения (нормирование по  $S_c$ , собственные данные);  $K_{пз}$  – относительно среднего для почв земли (10 нг/г) [42].

### Результаты и обсуждения

Средние концентрации Hg в листьях осины на территории всех исследованных районов юга Западной Сибири значимо отличаются друг от друга и меняются в интервале от 11 до 22 нг/г, составляя в среднем  $16 \pm 5,5$  нг/г (табл. 1). Распределение Hg в листьях осины исследованных районов носит однородный характер, что подтверждается данными расчета коэффициента вариации ( $C_V=24$  %). Максимальные концентрации Hg в листе осины (32 нг/г) выявлены на территории Томской области, минимальные (15 нг/г) – на территории Алтайского края.

Рассчитанные геоэкологические показатели свидетельствуют о превышении полученных данных в листьях осины на территории юга Западной Сибири над минимальным фоном [39], кларком ноосферы [40] и средними показателями для наземных растений [41] (табл. 1). Кроме того, в листе осины Томской области и Алтайского края концентрации Hg выше расчётного нормативного показателя – временно (ВДК). Возможным источником поступления поллютанта в листья осины на территории данных регионов выступает субстрат (через корневую систему, а также пыление и испарение с поверхности почвы) [3, 17]. Однако результаты расчета фактора обогащения элементом не подтвердили.

В пробах почвы среднее содержание ртути на территории юга Западной Сибири меняется в ин-

тервале 6–69 нг/г (табл. 2). Концентрации элемента в почвах характеризуются неоднородным характером распределения, о чем свидетельствуют данные расчета коэффициента вариации (63–75 %). Максимальные средние значения содержания ртути выявлены на территории Кемеровской области, при разбросе от 27 до 216 нг/г (рис. 2). Минимальные средние концентрации определены на территории Алтайского края, при разбросе 4–11 нг/г. На территории Томской области содержание поллютанта меняется в интервале 3–109 нг/г.

Данные расчетов геоэкологических показателей свидетельствуют об обогащении почв Кемеровской и, особенно, Томской области по результатам расчета фактора обогащения. Hg в почвах Кемеровской области также превышает кларк континентальной коры.

Средние концентрации Hg в листьях осины на территории всех исследованных участков Кемеровской области значимо отличаются друг от друга и меняются в интервале от 10 до 22 нг/г, в среднем составляя  $14,4 \pm 3,5$  нг/г (рис. 1). Распределение концентраций Hg равномерное, так же, как и для юга Западной Сибири ( $C_V=24$  %). Максимальные концентрации Hg в листе осины выявлены вблизи г. Мундыбаш, минимальные – в г. Таштагол. Повышенные концентрации Hg обнаружены на северо-западе исследованного района.

**Таблица 1.** Эколого-геохимические показатели ртутной нагрузки на территорию юга Западной Сибири по данным исследования проб листьев осины

**Table 1.** Ecological and geochemical indicators of mercury load on the territory of the south of Western Siberia according to a study of samples of aspen leaves

Регион/Region	C*, н/г/ng/g	Kc**	ВДК/TPC	K <sub>M</sub>	K <sub>N</sub>	K <sub>LM</sub>	K <sub>LP</sub>	K <sub>ФДМ</sub>	K <sub>E</sub>	K <sub>B</sub>
Кемеровская область Kemerovo Region	10–22***	1,8	0,9	0,7–1,5	0,1	0,3	1,0	0,1	0,02	0,3
Томская область Tomsk Region	12–34	2,5	1,2	0,6–1,7	0,1	0,4	1,3	0,2	0,0002	1,5
Алтайский край Altai territory	11–15	1,4	0,7	0,7–1,4	0,1	0,2	0,7	0,1	0,1	2,8

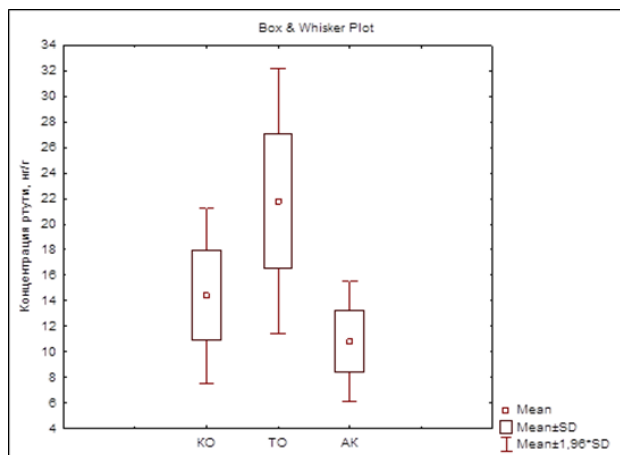
\* – концентрация Hg/Hg concentration, \*\* – расшифровка коэффициентов – в разделе «Объекты и методы»/decoding of coefficients is in section «Объекты и методы»; \*\*\* – минимум-максимум/minimum-maximum; TPC – temporary permissible concentration.

**Таблица 2.** Эколого-геохимические показатели ртутной нагрузки на территорию юга Западной Сибири по данным исследования поверхностной составляющей почв (0–10 см) в точках опробования осины

**Table 2.** Ecological and geochemical indicators of mercury load on the territory of the south of Western Siberia according to the study of the surface component of soils (0–10 cm) at aspen sampling points

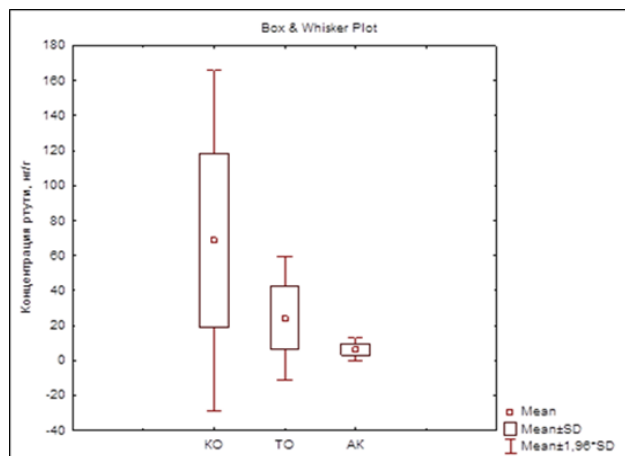
Регион/Region	C*, н/г/ng/g	Kc**	K <sub>ПДК</sub> /K <sub>МРС</sub>	K <sub>M</sub>	K <sub>K</sub>	K <sub>ПЗ</sub> /K <sub>SE</sub>	K <sub>E</sub>
Кемеровская область/Kemerovo Region	27–216***	0,7	0,03	0,4–3,2	1,1	6,8	1,3
Томская область/Tomsk Region	3–109	2,2	0,01	0,1–4,5	0,4	2,4	12,3
Алтайский край/Altai territory	4–11	0,2	0,003	0,2–1,7	0,1	0,6	0,2

\* – концентрация Hg/Hg concentration, \*\* – расшифровка коэффициентов – в разделе «Объекты и методы»/decoding of coefficients is in section «Объекты и методы»; \*\*\* – минимум-максимум/minimum-maximum.



**Рис. 1.** Концентрации ртути в листьях осины на территории юга Западной Сибири

**Fig. 1.** Mercury concentrations in aspen leaves in the south of Western Siberia



**Рис. 2.** Концентрации ртути в почвах на территории юга Западной Сибири

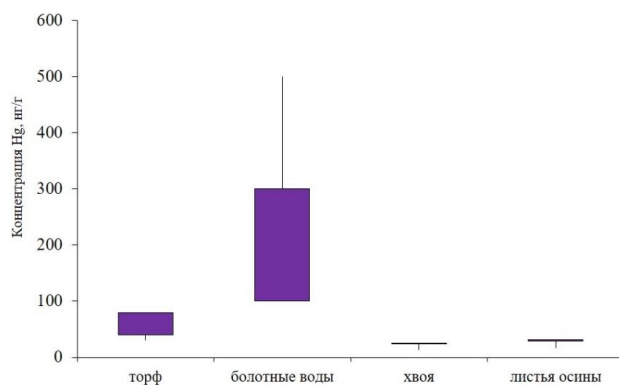
**Fig. 2.** Mercury concentrations in soil in the south of Western Siberia

Более детальный анализ проводился на территории г. Таштагол, в районе провала горной выработки по добыче железной руды. Данные биомониторинга выявили повышение накопления ртути в листьях осины с высотой произрастания дерева, т. е. на вершине сопки.

Территориальное распределение средних концентраций ртути в почвах не совпадает с данными по содержанию элемента в листьях осины, что подтверждается данными расчета коэффициента корреляции ( $r = 0,11$  при  $P=0,05$ ). Максимальные средние концентрации в субстрате выявлены также на вершине провала горной выработки по добыче железной руды (г. Таштагол), минимальные – вблизи г. Мундыбаш. При этом расчет коэффициента биоаккумуляции не выявил биодоступных форм ртути в почвах (табл. 1).

Средние концентрации Hg в листьях осины на территории всех исследованных районов Томской области меняются в интервале от 12 до 24 нг/г, составляя в среднем  $21,6 \pm 5,3$  нг/г (рис. 1). Распределение Hg в листьях осины также носит однородный характер ( $C_v=24\%$ ). Максимальные концентрации Hg в листе осины (25 нг/г), как и минимальные (15 нг/г), выявлены в центральных районах Томской области, которые, кроме того, граничат друг с другом – Колпашевском и Молчановском. Повышенные концентрации Hg обнаружены на северо-востоке Томской области.

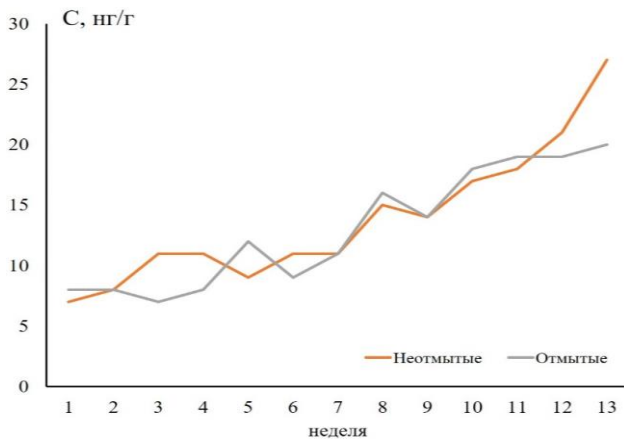
Более детальный анализ на территории Бакчарского района показал, что концентрации элемента в листьях значительно ниже, чем в сопряженных средах: сфагновом торфе и болотных водах [43], однако выше по сравнению с хвоей. Кратность превышения среднего содержания металла в торфе над листовой осины от 1,3 до 3,5 раз, в болотных водах – от 3,4 до 29 раз (рис. 3). Ртуть в листьях осины содержится от 1,5 до 46 раз больше, чем в хвое [11].



**Рис. 3.** Содержание Hg в сопредельных средах на территории Бакчарского района Томской области

**Fig. 3.** Hg content in adjacent environments in the Bakcharsky district of the Tomsk region

Эксперимент по выявлению особенностей накопления поллютанта в течение вегетационного периода проводился в Томском районе (пос. Богашево). По значению коэффициента вариации ртути (40 %) в листьях осины определяется однородная выборка. Следует отметить, что к концу вегетационного периода содержание поллютанта в листе значительно увеличивается, что согласуется с [44]. Также интересным было выявить влияние осадков на накопление Hg листовой пластиной. Для этого часть проб листьев отмывали дистиллированной водой согласно [33]. Среднее содержание ртути в пробах неотмытых листьев осины составляет  $14 \pm 5,7$  нг/г, а в отмытых –  $12,8 \pm 4,9$  нг/г, что практически совпадает с медианой (12 нг/г) и свидетельствует об отсутствии явных аномальных концентраций и значительном разбросе значений (рис. 4).



**Рис. 4.** Изменение содержания ртути в течение вегетационного периода

**Fig. 4.** Change in mercury content during the growing season

Рассчитанные геоэкологические показатели говорят об обогащении листьев осины элементом относительно кларка в наземных растениях, но средние содержания по выборкам меньше фоновых концентраций в листьях деревьев. Содержание Hg в листьях осины превышает этот показатель (17 нг/г) к концу вегетативного периода, а также, по нашим данным, листья осины лучше накапливают Hg за один вегетационный период по сравнению с хвоей [11]. Данный вывод соответствует исследованиям, которые утверждают, что лиственной опад является важнейшим источником поступления ртути в почву [25, 44].

Территориальное распределение средних концентраций ртути в почвах не совпадает с данными по содержанию элемента в листьях осины, что подтверждается данными расчета коэффициента корреляции ( $r = 0,04$  при  $P=0,05$ ). Максимальные средние концентрации в субстрате выявлены на западе района опробования на территории Томской области, минимальные – на северо-западе. При этом расчет коэффициента биоаккумуляции показал значительный вклад в накопление ртути листьями почвенной составляющей, т. е. значительное содержание в почвах Томской области биодоступных форм ртути.

Средние концентрации Hg в листьях осины на территории всех исследованных районов Алтайского края изменяются в интервале от 7 до 15 нг/г, составляя в среднем  $10,8 \pm 2,5$  нг/г. Распределение Hg в листьях осины исследованных районов носит однородный характер, что подтверждается данными расчета коэффициента вариации ( $C_v=24$  %). Максимальные и минимальные концентрации Hg в

листве осины отмечены на юго-западе района исследования.

Также не выявлено совпадений по территориальному распределению концентраций Hg в почвах и листьях ( $r = 0,18$  при  $P=0,05$ ). Максимальные средние концентрации в субстрате выявлены на северо-западе района исследования. При этом расчет коэффициента биоаккумуляции показал, что почвенная составляющая вносит самый высокий вклад в накопление ртути листьями во всех исследованных районах Сибирского региона. То есть практически во всех исследованных точках отбора проб листьев и почвы ртуть присутствует в биодоступных для биоты формах, что подтверждается данными по определению форм нахождения Hg в почвах Алтайского края [45]. Объяснить такую картину можно многолетним внесением удобрений, фунгицидов и гербицидов (в том числе гранозана), деятельностью предприятий химического производства как на территории Алтайского края («Алтайхимром»), так и трансграничным переносом с территории соседних районов и Республики Казахстан (ТОО «ХИМПРОМ 2011» г. Павлодар) с учетом преобладающего направления ветра [46–48].

#### Заключение

Данные по концентрации Hg в листе осины на территории юга Западной Сибири сопоставимы с таковыми для других территорий России и мира [11, 20, 48]. Результаты геоэкологических расчетов свидетельствуют о превышении концентраций относительно фона, кларка ноосферы и среднего для сухого вещества наземных растений. Однако, не смотря на влияние антропогенных факторов на территории юга Западной Сибири, не выявлено обогащение Hg листьев осины. Содержание поллютанта в субстрате также не превышает нормативных показателей, но данные расчета фактора обогащения относительно  $S_c$  свидетельствуют о накоплении Hg почвами Томской и Кемеровской областей. При этом в субстрате на опробованной территории Алтайского края выявлено присутствие элемента в доступной для растений форме, о чем свидетельствуют результаты расчета коэффициента биоаккумуляции. Территориально накопление Hg лиственной осины на юге Западной Сибири связано с преобладающим направлением ветра и воздействием антропогенных источников [11]. Исследование поступления элемента в точках, не испытывающих непосредственного антропогенного воздействия, необходимо для формирования базы данных о фоновых концентрациях и естественном геохимическом фоне на территории юга Западной Сибири.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mosses and lichens enhance atmospheric elemental mercury deposition in a subtropical montane forest / Xin Li, Xun Wang, Hui Zhang, Zhiyun Lu // *Environmental Chemistry*. – 2022. – V. 20. – № 3. – P. 105–113. DOI: 10.1071/EN22124.
2. A spatial assessment of current and future foliar Hg uptake fluxes across European forests / L. Wohlgenuth, A. Feinberg, A. Buras, M. Jiskra // *ESS Open Archive*. – 2023. – 15 May. DOI: 10.22541/essoar.168415517.70773917/v1 (accessed: 01.08.2023).
3. Investigation of the biochemical controls on mercury uptake and mobility in trees / M. Gustin, S. Dunham, J. Harper, Won-Gyu Choi, J. Blum, M. Johnson // *Sci Total Environ*. – 2022. – V. 851 (Pt 1). – P. 158101. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.158101
4. Добровольский В.В. Геохимическое земледование. – М.: ВЛАДОС, 2008. – 207 с.
5. Лесная энциклопедия: в 2 т. Т. 2 Лимонник – Ящерицы / под ред. Г.И. Воробьева и др. – М.: Сов. энциклопедия, 1986. – 631 с.
6. Ковальский В.В. Геохимическая экология. – М.: Наука, 1974. – 300 с.
7. Кароматов И.Д., Расулова Х.Н. Осина – перспективы использования в медицине // *Биология и интегративная медицина*. – 2017. – № 3. – С. 156–162.
8. Trees as bioindicator of heavy metal pollution in three European cities / T. Sawidis, J. Breuste, M. Mitrovic, P. Pavlovic, K. Tsigaridas // *Environmental Pollution*. – 2011. – V. 159. – P. 3560–3570.
9. Forest floor leachate fluxes under six different tree species on a metal contaminated site / L. van Nevel, J. Mertens, A. de Schrijver, L. Baeten, S. de Neve, F.M.G. Tack, E. Meers, K. Verheyen // *Sci Total Environ*. – 2013. – V. 447. – P. 99–107. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.12.074
10. McColl J.G. Seasonal nutrient variation in trembling aspen // *Plant and Soil*. – 1980. – V. 54. – P. 323–328.
11. Lyapina E.E., Peregudina E.V. Mercury pressure in the Tomsk region based on biomonitoring studies // *Limnology and Freshwater Biology*. – 2022. – № 3. – P. 1292–1294.
12. Новикова О.В., Макарова М.Г., Кошелева Н.Е. Ассоциации микроэлементов в древесной растительности г. Москвы и Кито // *Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности*. – 2004. – № 1. – С. 178–186.
13. Ковалевский А.Л. Биогеохимия растений. – Новосибирск: Наука: Сиб. отд-ие, 1991. – 294 с.
14. James T.D.W., Smith D.W. Short-term effects of surface fire on the biomass and nutrient standing crop of *Populus tremuloides* in southern Ontario // *Canadian Journal of Forest Research*. – 1977. – V. 7. – № 4. – P. 666–679.
15. Bargagli R. Trace elements in terrestrial plants: an ecophysiological approach to biomonitoring and biorecovery. – Berlin: Springer, 1998. – 324 p.
16. Goodman G.T., Roberts T.M. Plants and soils as indicators of metals in the air // *Nature*. – 1971. – V. 231. – P. 287–292.
17. Assessing the source of mercury in foliar tissue of quaking aspen / T. Frescholtz, M. Gustin, D. Schorran, G. Fernandez // *Environ Toxicol Chem*. – 2003. – V. 22. – № 9. – P. 2114–2119. DOI: 10.1002/etc.5620220922.
18. Mercury accumulation in leaves of different plant types – the significance of tissue age and specific leaf area / H. Pleijel, J. Klingberg, M. Nerentorp, M.C. Broberg, B. Nyirambangutse, J. Munthe, G. Wallin // *Biogeosciences*. – 2021. – V. 18. – № 23. – P. 6313–6328. DOI: 10.5194/bg-18-6313-2021
19. Gworek B., Dmuchowski W., Baczevska-Dąbrowska A. Mercury in the terrestrial environment: a review // *Environ Sci Eur*. – 2020. – V. 32. – P. 128. DOI: 10.1186/s12302-020-00401-x
20. Mercury uptake by vegetation and impacts on global mercury cycling / J. Zhou, D. Obrist, A. Dastoor, M. Jiskra, A. Ryjkov // *Nature Reviews Earth & environment*. – 2021. – V. 2. – P. 269–284. DOI: 10.1038/s43017-021-00146-y.
21. Шевченко О.С. Минеральные вещества, содержащиеся в листьях осины, произрастающей на территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры // *Проблемы рационального природопользования и история геологического поиска в Западной Сибири: сб. тез. IX региональной молодежной конф. им. В. И. Шпилемана*. – Ханты-Мансийск: Югорский формат, 2021. – С. 113–115.
22. Global change effects on biogeochemical mercury cycling / J.E. Sonke, H. Angot, Y. Zhang, A. Poulain, E. Bjorn, A. Schartup // *Ambio*. – 2023. – V. 52. – P. 853–876. DOI: 10.1007/s13280-023-01855-y
23. Dry and wet deposition fluxes and source of atmospheric mercury in the forest in Southeast China / H. Dong, X. Kang, S. Deng et al. // *Sustainability*. – 2023. – V. 15. – № 4. – P. 3213. DOI: 10.3390/su15043213
24. Геохимия почв и здоровье детей Томска / Л.П. Рихванов, С.Б. Нарзулаев, Е.Г. Язиков, Л.В. Капилевич, С.И. Сарнаев, Г.П. Филиппов. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1993. – 141 с.
25. Барановская Н.В. Закономерности накопления и распределения химических элементов в организмах природных и природно-антропогенных экосистем: автореф. дис. ... д-р. биол. наук. – Томск, 2011. – 46 с.
26. Гутак Я.М. Минерально-сырьевая база Кемеровской области (современное состояние, перспективы, проблемы) // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. – 2003. – № 6. – С. 61–65.
27. Вахрушев В.А. Вопросы минералогии, геохимии и генезиса железных руд Кондомского района Горной Шории (Западная Сибирь) // *ИГиГ СО АН СССР*. – Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1959. – 191 с.
28. Железнов Я.А. Зонирование территории Кемеровской области по уровню техногенной нагрузки с учетом экологического фактора // *Известия Иркутского государственного университета*. Серия: Науки о Земле. – 2021. – Т. 35. – С. 19–32.
29. Вазов В.М. Гречиха на полях Алтая: монография. – М.: ИД «Академии Естествознания», 2013. – 188 с.
30. Попрядухин В.Н. Основные экологические проблемы Алтайского края и пути их решения // *Роль Алтайского края в экологическом каркасе Российской Федерации: сб. тез науч.-практич. конф.* – Барнаул: Типография управления делами Правительства Алтайского края, 2017. – С. 6–8.
31. Клюев Н.Н. Экологические итоги реформирования России // *Вестник Российской академии наук*. – 2001. – Т. 71. – № 3. – С. 233–239.
32. Индикация компонентами природной среды трансграничного переноса загрязняющих веществ на территорию Горного Алтая / Ю.В. Робертус, В.Н. Удачин, Л.П. Рихванов, А.В. Кивацкая, Р.В. Любимов, Д.В. Юсупов // *Известия Томского политехнического университета*. – 2016. – Т. 327. – № 9. – С. 39–48.



33. Алексеенко В.А. Экологическая геохимия. – М.: Логос, 2000. – 627 с.
34. ГОСТ 17.4.4.02-2017. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. – М.: Стандартинформ. – 2018. – 12 с.
35. Зырин Н.Г., Малахов С.Г. Методические рекомендации по проведению полевых и лабораторных исследований почв и растений при контроле загрязнения окружающей среды металлами. – М.: Гидрометеиздат, 1981. – 187 с.
36. Дюкарев А.Г., Пологова Н.Н. Почвы Обь-Томского междуречья // Вестник Томского государственного университета. Биология. – 2011. – № 3 (15). – С. 16–37.
37. Подурец О.И. Специфика почвообразования Кузнецко-Алатауского и Горно-Шорского таежных районов // Ботанические исследования в Сибири. – Красноярск: Поликом, 2015. – Вып. 23. – С. 41–54.
38. Shuvaeva O.V., Gustaytis M.A., Anoshin G.N. Mercury speciation in environmental solid samples using thermal release technique with atomic absorption detection // Analytica Chimica Acta. – 2008. – V. 621. – № 2. – P. 148–154. DOI: 10.1016/j.aca.2008.05.034.
39. Янин Е.П. Ртуть в окружающей среде промышленного города. – М.: ИМГРЭ, 1992. – 192 с.
40. Глазовский Н.Ф. Геохимические потоки в биосфере. Избранные труды. В 2 т. Т. 1. Геохимические потоки в биосфере. – М.: Товарищество научных изданий КМК, 2006. – 535 с.
41. Markert V.A. Plants as biomonitors. Indicators for heavy metals in the terrestrial environment. – Weinheim: VCH, 1993. – 644 p.
42. Касимов Н.С., Власов Д.В. Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии // Вестник московского университета. Серия 5. География. – 2015. – № 2. – С. 7–17.
43. Домаренко В.А., Савичев О.Г., Перегудина Е.В. Особенности распределения химических элементов в болотных экосистемах Восточного Васоганья // Разведка и охрана недр. – 2017. – № 8. – С. 50–54.
44. 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. – V. 287. – P. 132157. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.132157
45. Ляпина Е.Е. Распределение форм нахождения ртути в профиле типичных почв южной Сибири // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2021. – Т. 2. – № 2. – С. 130–136.
46. Cataldo D.A., Wildung R.E. Soil and plant factors influencing the accumulation of heavy metals by plants // Perspectives of Environmental Hygiene. – 1978. – V. 27. – P. 149–159.
47. Geochemistry of mercury in soils and water sediments/ G. Ignatavičius, M. Unsal, P. Busher, S. Wolkowicz, J. Satkunas, G. Sulijine, V. Valskus // AIMS Environmental Science. – 2022. – V. 9. – № 3. – P. 277–297. DOI: 10.3934/environsci.2022019
48. Critical review on biogeochemical dynamics of mercury (Hg) and its abatement strategies/ A.D. Singh, K. Khanna, J. Kour, S. Dhiman, T. Bhardwaj, K. Devi, N. Sharma, P. Kumar, N. Kapoor, P. Sharma, P. Arora, A. Sharma, R. Bhardwaj // Chemosphere. – 2023. – V. 319. – P. 137917. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.137917

## REFERENCES

1. Xin Li, Xun Wang, Hui Zhang, Zhiyun Lu. Mosses and lichens enhance atmospheric elemental mercury deposition in a subtropical montane forest. *Environmental Chemistry*, 2022, vol. 20, no. 3, pp. 105–113. DOI: 10.1071/EN22124.
2. Wohlgemuth L., Feinberg A., Buras A., Jiskra M. A spatial assessment of current and future foliar Hg uptake fluxes across European forests. *ESS Open Archive*, 2023, 15 May. DOI: 10.22541/essoar.168415517.70773917/v1
3. Gustin M., Dunham S., Harper J., Won-Gyu Choi, Blum J., Johnson M. Investigation of the biochemical controls on mercury uptake and mobility in trees. *Sci Total Environ*, 2022, vol. 851 (Pt 1), p. 158101. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.158101
4. Dobrovolskiy V.V. *Geokhimicheskoe zemlevedenie* [Geochemical Earth science]. Moscow, VLADOS Publ., 2008. 207 p.
5. *Lesnaya entsiklopediya* [Forest Encyclopedia]. T. 2 *Limonnik – Yashcheritsy* [Schisandra – Lizards]. Ed. by G.I. Vorobyev. Moscow, Sovetskaya entsiklopediya Publ., 1986. 631 p.
6. Kovalskiy V.V. *Geokhimicheskaya ekologiya* [Geochemical ecology]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 300 p.
7. Karomatov I.D., Rasulova X.N. Aspen – prospects for use in medicine. *Biologiya i integrativnaya meditsina*, 2017, no. 3, pp. 156–162. In Rus.
8. Sawidis T., Breuste J., Mitrovic M., Pavlovic P., Tsigaridas K. Trees as bioindicator of heavy metal pollution in three European cities. *Environmental Pollution*, 2011, vol. 159, pp. 3560–3570.
9. Van Nevel L., Mertens J., De Schrijver A., Baeten L., De Neve S., Tack F.M.G., Meers E., Verheyen K. Forest floor leachate fluxes under six different tree species on a metal contaminated site. *Sci Total Environ*, 2013, vol. 447, pp. 99–107. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.12.074
10. McColl J.G. Seasonal nutrient variation in trembling aspen. *Plant and Soil*, 1980, vol. 54, pp. 323–328.
11. Lyapina E.E., Pereguina E.V. Mercury pressure in the Tomsk region based on biomonitoring studies. *Limnology and Freshwater Biology*, 2022, no. 3, pp. 1292–1294.
12. Novikova O.V., Makarova M.G., Kosheleva N.E. Assotsiatsii mikroelementov v drevesnoy rastitelnosti gg. Moskvy i Kito [Associations of trace elements in woody vegetation of Moscow and Quito]. *Vestnik RUDN. Seriya: Ekologiya i bezopasnost zhiznedeyatelnosti*, 2004, no. 1, pp. 178–186.
13. Kovalevskiy A.L. *Biogeokhimiya rasteniy* [Plant biogeochemistry]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1991. 294 p.
14. James T.D.W., Smith D.W. Short-term effects of surface fire on the biomass and nutrient standing crop of *Populus tremuloides* in southern Ontario. *Canadian Journal of Forest Research*, 1977, vol. 7, no. 4, pp. 666–679.
15. Bargagli R. *Trace elements in terrestrial plants: an ecophysiological approach to biomonitoring and biorecovery*. Berlin, Springer, 1998. 324 p.
16. Goodman G.T., Roberts T.M. Plants and soils as indicators of metals in the air. *Nature*, 1971, vol. 231, pp. 287–292.
17. Frescholtz T., Gustin M., Schorran D., Fernandez G. Assessing the source of mercury in foliar tissue of quaking aspen. *Environ Toxicol Chem*, 2003, vol. 22, no. 9, pp. 2114–2119. DOI: 10.1002/etc.5620220922.

18. Pleijel H., Klingberg J., Nerentorp M., Broberg M.C., Nyirambangutse B., Munthe J., Wallin G. Mercury accumulation in leaves of different plant types – the significance of tissue age and specific leaf area. *Biogeosciences*, 2021, vol. 18, no. 23, pp. 6313–6328. DOI: 10.5194/bg-18-6313-2021.
19. Gworek B., Dmuchowski W., Baczevska-Dąbrowska A. Mercury in the terrestrial environment: a review. *Environ Sci Eur*, 2020, vol. 32, pp. 128. DOI: 10.1186/s12302-020-00401-x.
20. Zhou J., Obrist D., Dastoor A., Jiskra M., Ryjkov A. Mercury uptake by vegetation and impacts on global mercury cycling. *Nature Reviews Earth & environment*, 2021, vol. 2, pp. 269–284. DOI: 10.1038/s43017-021-00146-y
21. Shevchenko O.S. Mineralnye veshchestva, soderzhashchiesya v listyakh osiny, proizrastayushchey na territorii Khanty-Mansiyskogo avtonomnogo okruga – Yugry [Mineral substances contained in the leaves of aspen growing on the territory of Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Yugra]. *Problemy ratsionalnogo prirodopolzovaniya i istoriya geologicheskogo poiska v Zapadnoy Sibiri. Sbornik tezisev IX regionalnoy molodezhnoy konferentsii im. V.I. Shpilmana*. [Problems of rational environmental management and the history of geological exploration in Western Siberia. Collection of abstract of the IX regional V.I. Shpilman youth conference]. Khanty-Mansiysk, Yugorskiy format Publ., 2021. pp. 113–115.
22. Sonke J.E., Angot H., Zhang Y., Poulain A., Bjorn E., Schartup A. Global change effects on biogeochemical mercury cycling. *Ambio*, 2023, vol. 52, pp. 853–876. DOI: 10.1007/s13280-023-01855-y
23. Dong H., Kang X., Deng S., Huang M., Chang M., Wang X. Dry and wet deposition fluxes and source of atmospheric mercury in the forest in Southeast China. *Sustainability*, 2023, vol. 15, no. 4, pp. 3213. DOI: 10.3390/su15043213
24. Rikhvanov L.P., Narzulaev S.B., Yazikov E.G., Kapilevich L.V., Sarnaev S.I., Filippov G.P. *Geokhimiya pochv i zdorovye detey Tomsk* [Soil geochemistry and health of Tomsk children]. Tomsk, Tomsk University Publ., 1993. 141 p.
25. Baranovskaya N.V. *Zakonomernosti nakopleniya i raspredeleniya khimicheskikh elementov v organizmakh prirodnikh i prirodno-antropogennykh ekosistem*. Avtoreferat Dis. Dokt. nauk [Regularities of accumulation and distribution of chemical elements in organisms of natural and natural-anthropogenic eco-systems. Dr. Diss. Abstract]. Tomsk, 2011. 46 p.
26. Gutak Ya.M. Mineralno-syrevaya baza Kemerovskoy oblasti (sovremennoe sostoyanie, perspektivy, problemy) [Mineral resource base of the Kemerovo region (current state, prospects, problems)]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya*, 2003, no. 6, pp. 61–65.
27. Vakhrushev V.A. *Voprosy mineralogii, geokhimii i genezisa zheleznykh rud Kondomskogo rayona Gornoy Shorii (Zapadnaya Sibir)* [Issues of mineralogy, geochemistry and genesis of iron ores of the Kondomsky district of Gornaya Shoria (Western Siberia)]. Novosibirsk, SO AN SSSR Publ., 1959. 191 p.
28. Zheleznov Ya.A. Zoning of the territory of the Kemerovo region according to the level of technogenic load, considering the environmental factor. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Nauki o Zemle*, 2021, vol. 35, pp. 19–32. In Rus.
29. Vazhov V.M. *Grechikka na polyakh Altaya: monografiya* [Buckwheat in the fields of Altai: a monograph]. Moscow, Akademiya Estestvoznaniya Publ. house, 2013. 188 p.
30. Popryadukhin V.N. Osnovnye ekologicheskie problemy Altayskogo kraya i puti ikh resheniya [The main environmental problems of the Altai Territory and ways to solve them]. *Rol Altayskogo kraya v ekologicheskoy karkase Rossiyskoy Federatsii. Sbornik tezisev nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Collection of abstracts of the scientific and practical conference]. Barnaul, Tipografiya upravleniya delami Pravitelstva Altayskogo kraya Publ., 2017. pp. 6–8.
31. Klyuev N.N. Ekologicheskie itogi reformirovaniya Rossii [Environmental results of Russia's reform]. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2001, vol. 71, no. 3, pp. 233–239.
32. Robertus Yu.V., Udachin V.N., Rikhvanov L.P., Kivatskaya A.V., Lubimov R.V., Yusupov D.V. Indication by the components of the natural environment of the transboundary transfer of pollutants to the territory of the Altai Mountains. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2016, vol. 327, no. 9, pp. 39–48. In Rus.
33. Alekseenko V.A. *Ekologicheskaya geokhimiya* [Ecological geochemistry]. Moscow, Logos Publ., 2000. 627 p.
34. *GOST 17.4.4.02-2017. Okhrana prirody. Pochvy. Metody otbora i podgotovki prob dlya khimicheskogo, bakteriologicheskogo, gelmintologicheskogo analiza* [State Standard 17.4.4.02-2017. Nature conservation. Soil. Methods of sampling and preparation of samples for chemical, bacteriological, helminthological analysis]. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 12 p.
35. Zyrin N.G., Malakhov S.G. *Metodicheskie rekomendatsii po provedeniyu polevykh i laboratornykh issledovaniy pochv i rasteniy pri kontrole zagryazneniya okruzhayushchey sredy metallami* [Methodological recommendations for conducting field and laboratory studies of soils and plants in the control of environmental pollution by metals]. Moscow, Gidrometeoizdat Publ., 1981. 187 p.
36. Dyukarev A.G., Pologova N.N. Soils of the Ob-Tomsk interfluve. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya*, 2011, no. 3 (15), pp. 16–37. In Rus.
37. Podurets O.I. Spetsifika pochvoobrazovaniya Kuznetsko-Alatausskogo i Gorno-Shorskogo taezhnykh rayonov [The specifics of soil formation in the Kuznetsk-Alataus and Gorno-Shor taiga regions]. *Botanicheskie issledovaniya v Sibiri* [Botanical research in Siberia]. Krasnoyarsk, Polikom Publ., 2015. Vol. 23, pp. 41–54.
38. Shuvaeva O.V., Gustaytis M.A., Anoshin G.N. Mercury speciation in environmental solid samples using thermal release technique with atomic absorption detection. *Analytica Chimica Acta*, 2008, vol. 621, no. 2, pp. 148–154. DOI: 10.1016/j.aca.2008.05.034
39. Yanin E.P. *Rtut v okruzhayushchey srede promyshlennogo goroda* [Mercury in the environment of an industrial city]. Moscow, IMGRE Publ., 1992. 192 p.
40. Glazovsky M.A. *Geokhimiya prirodnikh i tekhnogennykh landshaftov: (landshaftno-geokhimicheskie protsessy)* [Geochemistry of natural and man-made landscapes: (landscape-geochemical processes)]. Moscow, Geograficheskii fakultet MGU Publ., 2007. 350 p.
41. Markert B.A. *Plants as biomonitors. Indicators for heavy metals in the terrestrial environment*. Weinheim, VCH, 1993. 644 p.
42. Kasimov N.S., Vlasov D.V. Clarks of chemical elements as reference standards in ecogeochemistry. *Vestnik moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*, 2015, no. 2, pp. 7–17. In Rus.

43. Domarenko V.A., Savichev O.G., Peregudina E.V. Features of the distribution of chemical elements in the swamp ecosystems of Eastern Vasyugan. *Razvedka i okhrana neдр*, 2017, no. 8, pp. 50–54. In Rus.
44. Yusupov D.V., Lyapina E.E., Tursunaliyeva E.M., Osipova N.A., Baranovskaya N.V. Poplar tree (*Populus balsamifera* L.) as indicator of mercury emission from a point source. *Chemosphere*, 2022, vol. 287, pp. 132157. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.132157
45. Lyapina E.E. Distribution of forms of mercury in the profile of typical soils of southern Siberia. *Interexpo Geo-Sibir*, 2021, vol. 2, no. 2, pp. 130–136. In Rus.
46. Cataldo D.A., Wildung R.E. Soil and plant factors influencing the accumulation of heavy metals by plants. *Perspectives of Environmental Hygiene*, 1978, vol. 27, pp. 149–159.
47. Ignatavičius G., Unsal M., Busher P., Wolkowicz S., Satkunas J., Sulijine G., Valskus V. Geochemistry of mercury in soils and water sediments. *AIMS Environmental Science*, 2022, vol. 9, no. 3, pp. 277–297. DOI: 10.3934/environsci.2022019
48. Singh A.D., Khanna K., Kour J., Dhiman S., Bhardwaj T., Devi K., Sharma N., Kumar P., Kapoor N., Sharma P., Arora P., Sharma A., Bhardwaj R. Critical review on biogeochemical dynamics of mercury (Hg) and its abatement strategies. *Chemosphere*, 2023, vol. 319, pp. 137917. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.137917

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Елена Владимировна Перегудина**, старший преподаватель отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. pere-elena@mail.ru; orcid.org/0000-0003-4805-537X

**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; orcid.org/0000-0001-6116-0567

**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; orcid.org/0000-0003-3729-800X

Поступила в редакцию: 04.09.2023

Поступила после рецензирования: 03.11.2023

Принята к публикации: 30.11.2023

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Elena V. Peregudina**, Senior Lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. pere-elena@mail.ru; orcid.org/0000-0003-4805-537X

**Elena E. Lyapina**, Cand. Sc., Senior Researcher, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 10/3, Akademicheskyy avenue, Tomsk, 634055, Russian Federation. eeldv@mail.ru; orcid.org/0000-0001-6116-0567

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

Received: 04.09.2023

Revised: 03.11.2023

Accepted: 30.11.2023