

УДК 908.470.40+547

РТУТЬ В ПОЧВАХ И РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА ЗАПОВЕДНЫХ ТЕРРИТОРИЯХ ПРИМОРСКОГО КРАЯ

Барановская Наталья Владимировна¹,
nata@tpu.ru

Чекрыжов Игорь Юрьевич²,
chekr2004@mail.ru

Иванов Владимир Викторович²,
d159327@yandex.ru

Доронина Валерия Дмитриевна¹,
vddoronina@mail.ru

Осипова Нина Александровна¹,
osipova-nina@yandex.ru

Хвощевская Альбина Анатольевна¹,
unpc_voda@mail.ru

Паничев Александр Михайлович³,
sikhote@mail.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² Дальневосточный геологический институт,
Россия, 690022, г. Владивосток, пр. 100 лет Владивостоку, 159.

³ Тихоокеанский институт географии ДВО РАН,
Россия, 690091, г. Владивосток, ул. Радио, 7.

Актуальность. Неуклонный рост в мире геохимических и экологических исследований ртути в локально-регионально-планетарном плане связан с активной циркуляцией и вездесущностью ее различных форм в наземных и водных средах биосферы, а также с ее супертоксичностью и высокой биодеструктивностью. Актуальность настоящего исследования определяет применение современных инструментальных средств высокочувствительного анализа при биогеохимическом изучении разнотипных компонентов системы растение–подстилка–почва на трех полигонах заповедных горнолесных территорий юга Дальнего Востока.

Цель: установить содержание ртути в растительности и почвах Приморского края.

Объекты: почвы, растительный опад, лесная подстилка, растения Приморского края.

Методы. Определение содержания массовой доли общей ртути проведено в МИНОЦ «Урановая геология» в отделении геологии ТПУ без предварительного химического разложения проб методом беспламенной атомно-абсорбционной спектрометрии. Применен ртутный анализатор РА-915+ с пиролитической приставкой РП-91С (ООО Люмэкс, г. Санкт-Петербург) и ИСП-МС в Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии.

Результаты. Полученные результаты характеризуют содержание ртути соседствующих почв, растительного опада и растительности в совокупности трех природораздельных участков хребта Сихотэ-Алинь, которые расположены в пределах охраняемых, потенциально геохимически «девственных» природных территорий Приморского края. Среднее содержание ртути для почв районов окрестностей ручья Ванчин-Угольный, Шандуйских озер и притока реки Бикин составило, соответственно (мг/кг): 0,162 (размах 0,046–0,298), 0,098 (размах 0,015–0,264) и 0,117 (размах 0,021–0,28). Различия в содержании ртути в почвах исследуемых территорий зависят от количества органической составляющей и ландшафтных особенностей местности. Содержание ртути в разных видах растительности составило: лишайник (0,135 мг/кг), папоротник (0,0383 мг/кг), лабазник (0,023 мг/кг), осока (0,016 мг/кг), что объясняется различной способностью растений к физиолого-биологическому фиксации водорастворимых форм ртути. Более высокие содержания ртути в почвах, по сравнению с растительной подстилкой и самой растительностью, – свидетельство многолетнего скапливания запасов этого металла и связывания его основной массы в органоминеральной форме в почвах.

Ключевые слова:

биогеохимия ртути, почвы, растительный опад, растения, заповедные территории, Сихотэ-Алинь.

Введение

Неуклонный рост в мире геохимических и экологических исследований ртути в локально-регионально-планетарном плане связан с активной циркуляцией и вездесущностью ее различных форм в наземных и водных средах биосферы, а также с ее супертоксичностью и высокой биодеструктивностью. Интерес к содержанию ртути в природных средах огромен во всем мире в связи с ее высокой летучестью, токсичностью органических форм [1–3]. Содержание ртути в почвах зависит от типа и подтипа почв, их агрофизической и агрохимической характеристики [4]. Об-

зор литературы по вопросам, связанным с загрязнением ртутью земной поверхности, почвы и растений и трансформацией соединений ртути [5, 6], показывает, что на поверхности суши осаждение ртути происходит в основном в окисленной форме (Hg^{2+}) и ее превращения связаны в первую очередь с окислительно-восстановительным потенциалом окружающей среды и биологическими и химическими процессами метилирования. Осаждение ртутных загрязняющих веществ на земле с низкой растительностью в 3–5 раз ниже, чем в лесах. Наибольшее количество ртути выбрасывается из тропических регионов, за ко-

торыми следует умеренная зона, а самые низкие уровни – из полярных регионов. Районы с растительностью в соответствии с размером выбросов располагаются в следующей последовательности: леса > другие районы (тундра, саванны и чапараль) > сельскохозяйственные районы > пастбищные экосистемы. Участки суши, лишённые растительности, выделяют больше ртути, чем участки с растениями.

Устойчив интерес к содержанию ртути в почвах крупных промышленных городов и промышленных центров с высокой антропогенной нагрузкой. На территориях с высоким уровнем загрязнения, таких как районы вблизи ртутных шахт, содержание ртути в почве и растений намного выше, чем на территориях другого использования. Загрязнённая ртутью почва встречается вокруг шахт, промышленных площадок и ртутных рудников в пределах провинции Гуйчжоу (Китай), где содержание ртути составляет 2920 мг/кг. В пределах ртутных рудников Учунь и Ланьмучан (Китай) содержание ртути составляет 237–477 мг/кг, в то время как в других местах не превышает 100 мг/кг [6–8]. На территории России в горнорудных районах Алтайского края содержание ртути в почвах составляет от 250 до 66000 мг/кг [9]. Обширные ореолы с повышенным содержанием ртути формируются не только в горнорудных районах, но и в районах химических, металлургических, теплоэнергетических комплексов, в районах крупных промышленных аварий, связанных с выбросами ртути в прошлом [10–13].

Содержание ртути в почвах агроценозов России колеблется от 0,01 до 0,16 мг/кг [14]. Вместе с тем для проведения фонового мониторинга, для установления связи между содержанием ртути и свойствами подстилающей поверхности, для выделения реально вклада антропогенной составляющей, представляет интерес установление содержания ртути на фоновых территориях, удалённых от крупных промышленных центров. Так, на территории Воронежского заповедника содержание ртути варьируется от 0,006 до 0,212 мг/кг в зависимости от типа почв, среднее содержание ртути в почвах Окского заповедника составляет 0,021 мг/кг [15], содержание ртути в почвах Северной Осетии составляет 0,500 мг/кг, в Республике Крым – 0,012–0,037 мг/кг [16, 17].

На территории Дальнего Востока также проводились исследования по установлению содержания ртути в почве. В почвах территории г. Благовещенска среднее содержание ртути составляет 0,092 мг/кг, на территориях островов Русский и Шкота средние содержания ртути составляют от 0,058 до 0,158 мг/кг [18]. На территориях Приморского и Хабаровского краёв коэффициент концентрации ртути относительно кларка в верхней части континентальной земной коры по А.П. Виноградову составляет от 25 до 75 [18].

Данные по содержанию ртути в растительности используются достаточно широко для выявления источников техногенного загрязнения [2]. Ртутметрии биолого-почвенных объектов дальневосточных экосистем посвящены немногочисленные публикации эколого-геохимической проблематики. Так, в полынях и в листьях дуба содержание ртути варьируется от 0,007 до

0,013 мг/кг и от 0,014 до 0,033 мг/кг, соответственно, для территорий острова Русский, острова Шкота [19]. Как правило, ранее при анализе ртути применялось недостаточно совершенное по настоящим меркам аналитическое оборудование. В большинстве случаев были опробованы территории с заметной антропогенной нагрузкой на природную среду (районы Краснореченской обогатительной фабрики, Дальнегорского рудного узла, Абрамовского рудопроявления, Вознесенского рудного района). Вместе с тем исследования по содержанию ртути в компонентах природных сред на заповедных особо охраняемых территориях явно недостаточно, что обуславливает актуальность данной работы.

В настоящем исследовании изучено содержание ртути в разнотипных компонентах системы растение–подстилка–почва на трех полигонах заповедных горнолесных территорий юга Дальнего Востока с применением современных инструментальных средств высокочувствительного анализа. Целесообразно охарактеризовать ртутьносность в совокупности соседствующих почв, растительного опада и растительности трех приводораздельных участков хребта Сихотэ–Алинь, что в пределах охраняемых, потенциально геохимически «девственных» природных территорий Приморского края.

Материал и методы исследования

Отбор проб почв, растительного опада и растительности для многоцелевых исследований по проекту РНФ, в том числе ртутметрических, произведен в летний полевой период 2020 г.

Для проботбора природного биолого-почвенного материала были выбраны геолого-геоморфологические и ботанически сравнительно «индивидуальные» районы (полигоны) на западном склоне Сихотэ–Алиния, неодинаково приподнятые относительно уровня моря и отстоящие друг от друга на первые сотни километров в меридиональной полосе протяженностью порядка 400 км. Они по-разному удалены от крупных населённых пунктов и очагов хозяйственной деятельности (в т. ч. Приморской ГРЭС в г. Лучегорске), равно как и от геологических объектов (в первую очередь, месторождений угля и рудного сырья), которые принадлежат к потенциальным местным (локальным) источникам антропогенной и естественной эмиссии ртути (рис. 1). Это районы: 1) окрестностей руч. Ванчин–Угольный, приток р. Милоградовки в Национальном парке «Зов тигра» (далее В-район); 2) Шандуйских озёр в Сихотэ–Алинском государственном биосферном заповеднике (далее Ш-район) и 3) верховья р. Пещерки, приток р. Бикин в национальном парке «Бикин» (далее Б-район).

На этих территориях низко- и среднегорья, что пространственно относятся к Восточно–Сихотэ–Алинскому вулканическому поясу, развиты верхнемеловые–среднепалеогеновые кремнекислые и среднекислые вулканические и вулканогенно–осадочные породы.

Почвы данных территорий относятся к подбурям и бурозёмам, согласно Классификации и диагностике почв России [20]. Они имеют слабо дифференцированный мелкозёмисто–щебнистый профиль с высоким содержанием в верхней части слабо разложившегося органического вещества [21]. Такие почвы, как из-

вестно, имеют кислую реакцию среды почвенного раствора, невысокую насыщенность почвенного поглощающего комплекса основаниями и в средней части профиля обилие силикатных и оксалаторасторимых оксидов Al и Fe [20]. Для бурозёмов подобных мест отбора проб характерно незначительное увеличение фракции ила в нижней части профиля [22, 23].

Во всех случаях для ртутметрии параллельно отбирались пробы почв и растительного опада. Так, в В-районе было отобрано 11 проб почв и 7 проб растительного опада; в Ш-районе – 22 пробы почв и 15 проб растительного опада и в Б-районе – 18 проб почв и 16 проб растительного опада [24].

Опробование и определение содержания ртути в растительности проводилось только для Шандуйского участка, характеризуемого образцами: лишайники рода *Usnea* – 5 шт., лабазник рода *Filipéndula* – 18 шт., осоки (*Cárex*) – 26 шт. и папоротники рода *Polypodióphyta* – 23 шт. При полевом сборе на каждой точке наблюдений отщипывались листья от нескольких растений в радиусе до 3 м. Лишайники чаще всего отбирались с нескольких деревьев в радиусе до 10 м.

Пробоподготовка проб почв и растений происходит в несколько этапов: предварительное подсушивание, удаление каких-либо включений, растирание и просеивание [25, 26].

Пробоподготовка к проведению анализа проводится в соответствии с методическими указаниями для определения ртути атомно-абсорбционным методом согласно ПНД Ф 16.1:2.2.80-2013 (М 03-09-2013) [27], методическими указаниями для пробоподготовки [28].

Определение содержания массовой доли общей ртути проведено в МИНОЦ «Урановая геология» в отделении геологии ИШПР ТПУ без предварительного химического разложения проб, методом беспламенной атомно-абсорбционной спектрометрии (ААС). Применен ртутный анализатор РА-915+ с пиролизической приставкой РП-91С (ООО Люмэкс, г. Санкт-Петербург). Принцип его действия основан на термическом разложении пробы с последующим детектированием образующейся атомарной ртути методом атомной абсорбции с зеемановской коррекцией неселективного поглощения. Дозатор, содержащий известную массу или объём образца, помещают в атомизатор. При разогреве и разложении пробы по заданному температурному режиму из нее выделяется атомарная ртуть Hg^0 , которая переносится потоком газа-носителя (воздуха) в аналитическую кювету. Спектрометр измеряет поглощение резонансного излучения с длиной волны 254 нм атомами ртути. Для градуировки использовали образцы почв СДПС ГСО 2498-83–2500-83 (НПО «Тайфун», г. Обнинск, Россия).

Методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой выполнен элементный анализ почв, в том числе анализ ртути в 11 пробах, с использованием масс-спектрометра NexION 300D (Perkin Elmer, США), для определения сходимости результатов двух методов. Предварительно проба почв проходила процедуру пробоподготовки (разложения) в кислой среде путем ее окисления под действием температуры и добавления смеси концентрированной соляной и азотной кислот в

герметичных контейнерах при повышенном давлении в микроволновой системе МС-6 с соблюдением соответствующего режима минерализации [29].

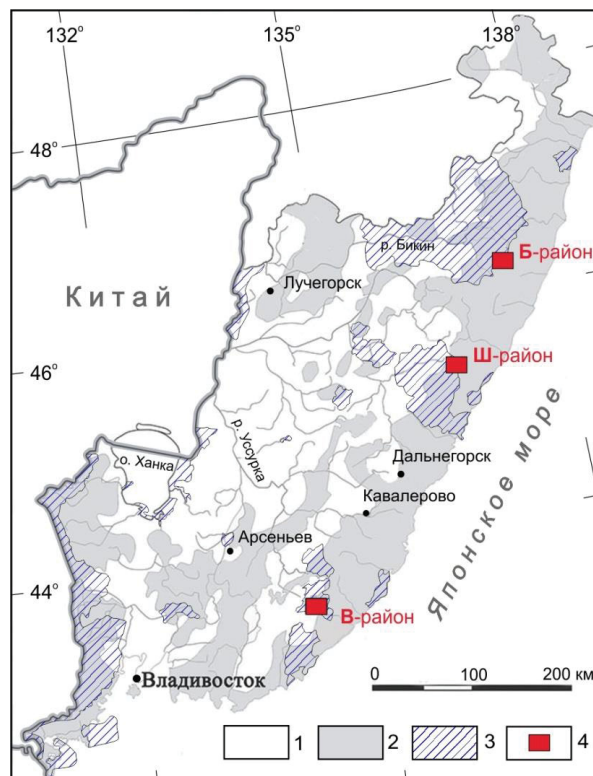


Рис. 1. Карта мест отбора проб в границах Восточно-Сихотэ-Алинского вулканического пояса и заповедных территорий: 1, 2 – породные комплексы: 1 – докайнозойские осадочные, 2 – разновозрастные вулканические; 3 – заповедные территории; 4 – полигоны пробоотбора почвы, растительного опада и растительности

Fig. 1. Map of sampling locations within the Eastern Sikhotealin volcanic belt and protected areas: 1, 2 – rock complexes: 1 – Pre-Cenozoic sedimentary, 2 – different-age volcanic; 3 – protected areas; 4 – sampling sites of soil, vegetation fallout and vegetation

После разложения минерализат исследовался на масс-спектрометре при условиях съемки, указанных в [30].

Сравнение данных по определению ртути в почвах В-района, полученных методами ААС и ИСП-МС, показывает хорошую сходимость результатов указанных методов спектрометрии, коэффициент корреляции 0,92 (рис. 2).

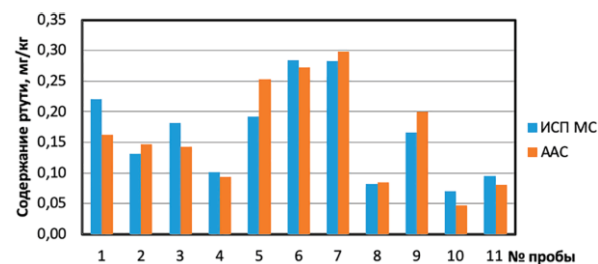


Рис. 2. Сравнение результатов определения ртути в почвах из В-района методами ААС и ИСП-МС

Fig. 2. Comparison of results of mercury determination in soils from the B-region by AAS and ICP-MS methods

Результаты исследования

Атомно-абсорбционным методом в пробах почв, отобранных на трех обозначенных выше полигонах заповедных территорий западных отрогов Сихотэ-Алиня, выявлен широкий диапазон колебания содержания в них массового количества ртути – от 0,013 до 0,298 мг/кг (табл. 1).

Среднее ее содержание для почв районов **В**, **Ш** и **Б** составило, соответственно (мг/кг): 0,162 (размах 0,046–0,298); 0,098 (размах 0,015–0,264) и 0,117 (размах 0,021–0,28).

Таблица 1. Содержание ртути в почвах характеризующих районов Приморского края, мг/кг

Table 1. Mercury content in soils of the characterized areas of Primorsky Krai, mg/kg

Статистика Statistics	Район/Region		
	В	Ш	Б
N	11	22	18
Min	0,046	0,013	0,021
Max	0,298	0,264	0,280
X	0,162	0,098	0,117
M	0,147	0,084	0,100
S	0,085	0,069	0,079

Примечание/Note: N – количество проб (number of samples), M – медиана (median), Min – минимум (minimum), Max – максимум (maximum), X – среднее арифметическое (arithmetic mean), S – стандартное отклонение (standard deviation).

В порядке увеличения среднего содержания ртути в почве эти полигоны выстраиваются в следующий ряд (мг/кг): **Ш**-район (0,098), **Б**-район (0,117) и **В**-район (0,162).

Характер распределения содержания ртути в изученных пробах показан на рис. 3 (слева), где приведены коэффициенты концентрации ртути относительно среднего содержания ртути в кларке верхней части континентальной земной коры по А.П. Виноградову, которое составляет 0,083 мг/кг [31].

Из рис. 3 видно, что в характеризующих почвах при общем диапазоне варьирования содержания ртути 0,013–0,298 мг/кг (табл. 1) модальный интервал частных значений ее содержания не превышает значения 0,05–0,15 мг/кг.

В табл. 2 приведены статистические данные о содержании ртути в растительном опаде на изученных заповедных территориях.

Таблица 2. Содержание ртути в растительном опаде характеризующих районов Приморского края, мг/кг

Table 2. Mercury content in vegetation fallout of the characterized areas of Primorsky Krai, mg/kg

Статистика Statistics	Район/Region		
	В	Ш	Б
N	7	15	16
Min	0,041	0,035	0,027
Max	0,053	0,136	0,161
X	0,045	0,076	0,092
M	0,045	0,069	0,085
S	0,004	0,033	0,046

Примечание/Note: N – количество проб (number of samples), M – медиана (median), Min – минимум (minimum), Max – максимум (maximum), X – среднее арифметическое (arithmetic mean), S – стандартное отклонение (standard deviation).

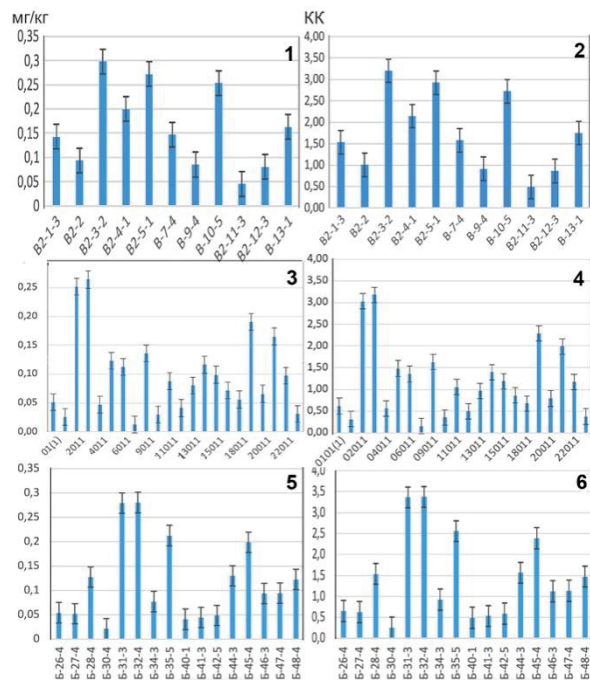


Рис. 3. Ртуть в почвах заповедных территорий Приморского края: валовые содержания (слева) и коэффициенты концентрации относительно средних содержаний в почвах мира (А.П. Виноградов, 0,083 м/кг): 1, 2 – **В**-район, 3, 4 – **Ш**-район, 5, 6 – **Б**-район

Fig. 3. Mercury in the soils of the protected territories of Primorsky Krai: gross contents (left) and concentration coefficients relative to the average contents in the upper part of the continental crust (A.P. Vinogradov, 0,083 m/kg): 1, 2 – **V**-district, 3, 4 – **Sh**-district, 5, 6 – **B**-district

Растительный опад данных полигонов имеет менее широкий, чем для почв, диапазон вариации содержания ртути – 0,027–0,161 мг/кг (табл. 2). По ртутоносности проб сравнительно однородна лишь выборка Ванчин-Угольного полигона, а размах значений содержания ртути в пробах остальных двух объектов соизмерим с приведенным выше общим диапазоном колебания (в мг/кг): **В**-район 0,041–0,053, **Ш**-район 0,035–0,136 и **Б**-район 0,027–0,161.

Средние содержания ртути в растительном опаде в целом варьируют от 0,045 до 0,092 мг/кг. Для исследуемых районов они выстраиваются в следующий ряд (по убыванию, мг/кг): **Б** (0,092) > **Ш** (0,076) > **В** (0,045).

Сравнение ртутоносности растительного опада показало, что в большинстве случаев для пар «опад–почва» в пробах районов **Ш** и **Б** содержание ртути в опаде, как правило, несколько меньше, чем в почве, а в **В**-районе эта разница существеннее (рис. 4).

Содержание ртути в растительности изучено только для **Ш**-района на примере лесных растений напочвенного покрова – лишайников, папоротников, осок и лабазника (табл. 3, рис. 5, А, Б). Средняя концентрация ртути в сухом веществе четырех видов недревесных растений этого фитоценоза в одном и том же месте широко колеблется от 0,016 до 0,135 мг/кг (табл. 3). При этом в конкретных пробах папоротников, лабазника и осои величина ртутоносности обычно ниже 0,05 мг/кг (рис. 5, А).

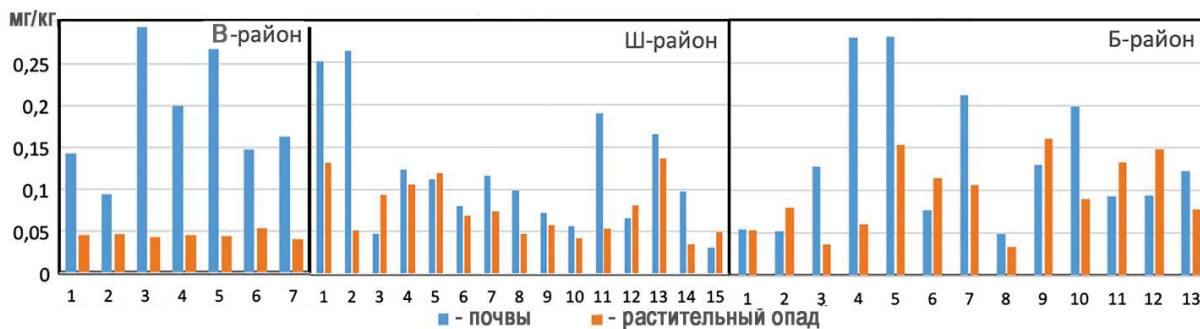


Рис. 4. Сравнение содержание ртути в почве и в растительном опаде в трех районах Приморского края

Fig. 4. Comparison of mercury content in soil and in vegetation fallout plant litter in three districts of Primorsky Krai

Таблица 3. Содержание ртути в почве, растительном опаде и растительности в пробах с территории Ш-района, мг/кг

Table 3. Mercury content in soil, vegetation fallout and vegetation in samples from the territory of the Sh-district, mg/kg

Статистика Statistics	Почва Soils	Растительный опад Vegetation fallout	Лишайники Lichen	Лабазник Dropwort	Папоротник Fern	Осока Sedge
N	22	15	5	18	23	26
Min	0,0128	0,035	0,088	0,0112	0,0144	0,0065
Max	0,2639	0,1361	0,2047	0,0361	0,0696	0,0298
$X \pm \delta m$	0,098±0,01	0,076±0,008	0,135±0,02	0,023±0,02	0,0383±0,003	0,016±0,001
S	0,069	0,033	0,051	0,0074	0,013	0,005

Примечание/Note: N – количество проб (number of samples), M – медиана (median), Min – минимум (minimum), Max – максимум (maximum), X – среднее арифметическое (arithmetic mean), δm – стандартная ошибка стандартного отклонения (standard error of standard deviation), S – стандартное отклонение (standard deviation).

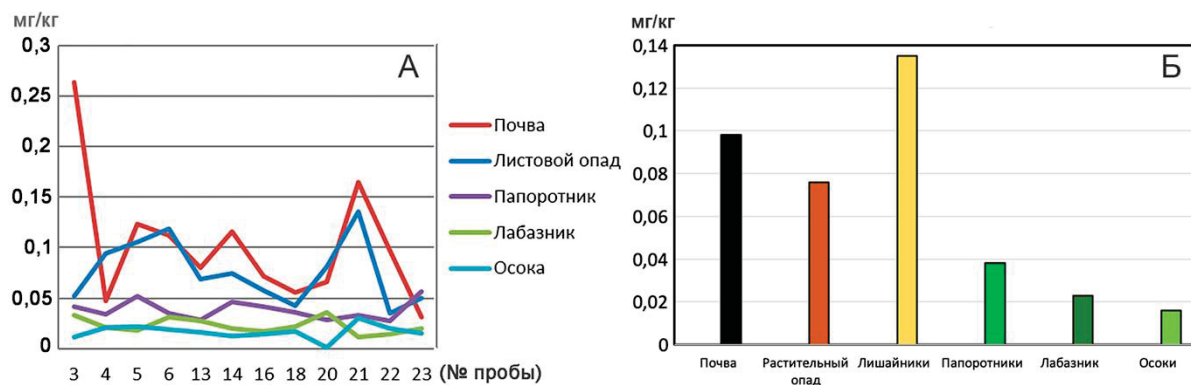


Рис. 5. Содержание ртути в пробах почв, растительного опада, лабазника, осок и папоротников Ш-района (А) и средние содержания ртути в пробах (Б)

Fig. 5. Mercury content in samples of soils, vegetation fallout, lichens, dropwort, sedges and ferns of the Sh-region (A) and average mercury content in samples (B)

Среднее содержание ртути в пробах названных видов растительности не контрастно уменьшается (рис. 5, Б) в ряду (мг/кг): лишайники (0,135) > папоротники (0,0383) > лабазник (0,023) > осоки (0,016).

Обсуждение

В глобальном плане размах средних содержаний ртути 0,013–0,046 мг/кг в почвах данных объектов меньше среднего содержания ртути 0,065 мг/кг [32] и 0,07 мг/кг [33] в верхней части континентальной коры.

Выявленный для сравниваемых районов модальный интервал 0,05–0,15 мг/кг (при диапазоне 0,013–0,298 мг/кг) не выходит за рамки колебания содержания ртути 0,04–0,23 мг/кг в сухой массе проб из поверхностного слоя лесных почв различных стран [34].

Указанный модальный интервал содержания ртути в почвах характеризуемой полосы протяженностью 400 км среднего и центрального Сихотэ-Алиня сопо-

ставим с диапазонами содержания ртути (0,09–0,147; 0,036–0,159 и 0,059–0,104 мг/кг [35, 36]) в почвах и буроземах смешанных хвойно-лиственных лесов на островах Русский и Шкота в Японском море. Административно это малоосвоенная окраина г. Владивостока длиной 16 км [19].

Средние содержания ртути в почвах из придорожных полигонов, удаленных от крупных промышленных центров в Амурской области, Хабаровского и Приморского краев, составляют соответственно: 0,72; 1,0 и 1,2 мг/кг [18]. При этом средний показатель для подобных почв Приморья с антропогенным заражением почти на порядок выше средних концентраций ртути в изученных нами лесных почвах горных районов.

Исследователи изотопии ртути для системы почва – материнская порода полагают, что литогенная ртуть не является возможным ее основным источником в минеральных почвах [32]. Поэтому закономер-

но, что средневзвешенное среднее содержание ртути 0,12 мг/кг в почвах западного фланга Восточно-Сихотэ-Алинского вулканогена (рис. 1) в половину меньше, чем средневзвешенное среднее содержание ртути 0,24 мг/кг в кайнозойских вулканитах Дальнего Востока в целом. Последнее значение (при размахе средних 0,01–1,10 мг/кг) установлено по 22-м выборкам ряда вулканоструктур Приморья и других регионов Востока России [37].

По литературным данным [3,38], повышенными содержаниями ртути от 0,15 до 0,47 мг/кг характеризуются наиболее богатые органическим веществом горизонты почв, в том числе торфяные горизонты с разной степенью разложения растительных остатков в пойменных лесных и торфяных почвах, а также бурые горнолесные почвы.

Торфяные отложения на территории Хабаровского и Камчатского краев, Амурской и Сахалинской областей содержат ртуть в концентрации 0,2–0,3 мг/кг, при этом торфа низинного и переходного типа содержат значительно больше этого элемента, чем торфа верхового типа [39].

Общеизвестно, что при формировании поверхностного почвенного горизонта происходит унаследование вещественных особенностей лесного опада и подстилки соответственно. Так, более высокие накопления ртути наблюдаются в почвах, что находятся под растительным опадом, продуцентом органики для их гумуса, хвойных пород деревьев (сосна, пихта и ель) и буков, чем в почвах под листовым опадом дуба, ольхи и березы [40]. Это подтверждает установленная нами значимая положительная корреляция ($r_k=0,65$) между содержанием ртути в почве и в лесной подстилке **Ш**-района (Шандуйские озера).

В связи с этим установленное на протяжении 400 км последовательное возрастание (0,045→0,076→0,092 мг/кг) среднего содержания ртути в лесном опаде данных районов с юга на север, вероятнее всего, отражает тренд биоклиматического влияния на общую меридиональную и локальную высотную смену растительности. Соответственно можно ожидать и смены микроэлементного состава горнолесной подстилки в неодинаково расположенных над уровнем моря этих территорий: от низкогогорного **В**-района к умеренно среднегорному **Ш**-району и среднегорному **Б**-району. Поэтому для наиболее «ртутистого» последнего полигона очевидны сравнительно более высокие: солнечная активность, частота атмосферных осадков и доля в лесах хвойных растений. А значит, более высокие поступления в почву ртути от сухого или влажного (*очистка от газообразной и аэрозольной Hg-содержащих фаз*) осаждения вещества, принесенного воздушными потоками из региональных и локальных естественных и антропогенных источников эмиссии ртути.

Наблюдаемые в нашем случае более высокие содержания ртути в почве по сравнению с растительной подстилкой и тем более с самой растительностью – свидетельство многолетнего скапливания запасов этого металла в ее верхнем гумусово-аккумулятивном слое. Поступающие в этот горизонт почвы и в лесную подстилку различные формы ртути претерпевают

трансформацию в ходе биогеохимических процессов. Происходит ключевое связывание ее основной массы в различные металлокомплексы с органическими лигандами в органоминеральной массе. В качестве Hg-содержащих комплексных соединений в почвах удерживается до 70–80 % валовой ртути [41].

Кроме того, в почвах происходит связывание ртути при физической и химической ее сорбции неорганическим аутигенным минеральным веществом (каолинит, монтмориллонит и гидрослюда, оксиды Fe, Al и Si; и др. [42, 43].

Оценивая содержание ртути в тканях растительности, отметим, что в осоках оно аналогично мировому кларку ртути, а в остальных растениях этого фитоценоза в 2–10 раз выше кларка, равного 0,012 мг/кг (для сухой фитомассы) [44], в приросте растительности Мировой суши. Это можно трактовать избирательно-селективными способностями различных культур растительности к физиолого-биохимическому листовому и корневому фиксированию водорастворимых форм ртути. Известно, что лишайники и мхи показывают более выраженную способность биоаккумулировать ртуть комбинированно из почвы и атмосферы [45]. Но надо иметь в виду, что ртуть настолько сильно связывается почвенно-поглощающим комплексом, что даже при очень высоком содержании (50–100 мг/кг) она не накапливается в растениях в токсичных концентрациях [46].

Антропогенная региональная составляющая некоторого повышения содержания ртути в различных компонентах биосферы заповедных территорий Юга Дальнего Востока отчасти связана с непосредственной близостью стран азиатско-тихоокеанского региона.

Предполагается, что антропогенная доля ртути над северо-западной частью Японского моря контролируется в основном переносом воздушных масс из Китая. С его территории происходит самая значительная эмиссия ртути в мире [34, 47, 48].

Среди региональных природных причин возможного влияния с востока на общий фон ртути в Приморье отметим, прежде всего, такие геогенные источники эмиссии ее в газовой и аэрозольной формах, как многочисленные вулканы (даже потухшие), а также кипящие источники и паровые струи термальных источников и высокотемпературных гидротермальных систем Курило-Камчатской «огненной дуги».

В локальном плане воздушный приток ртути с запада, дополняющий ее суммарный вклад в неравномерное местное загрязнение почвы и растительности обозначенной территории, логично связать с природной газононостью тектонизированных зон угольных залежей Партизанского и Бикино-Уссурийского палеобассейнов, а также с антропогенными источниками ртути в виде продуктов преднамеренного сжигания углей, особенно на Приморской ГРЭС в г. Лучегорске.

Тем не менее, согласно медико-экологическим нормативам, содержание ртути в почвах с максимумом среднего 0,162 мг/кг, что зафиксировано нами в районе бассейна р. Ванчин-Угольной, практически не превышает значения минимально действующей концентрации (ISQG) 0,130 мг/кг, а тем более уровня ве-

роятого эффекта (PEL) 0,700 мг/кг [49]. Столь невысокие валовые содержания металла объясняются, в первую очередь, низким уровнем хозяйственного и промышленного освоения этих территорий, что потенциально минимизирует роль антропогенной составляющей в поставке ртути в природную среду и позволяет расценивать геоэкологическое состояние обозначенной территории по содержанию ртути в почве и растительной подстилке как благополучное.

Заключение

Таким образом, в работе представлены результаты по биогеохимическому изучению содержания ртути в разнотипных компонентах системы растение–подстилка–почва на трех полигонах заповедных горнолесных территорий юга Дальнего Востока.

Среднее содержание ртути для почв районов окрестностей ручья Ванчин-Угольный, Шандуйских озер и притока реки Бикин составило, соответственно (мг/кг): 0,162 (размах 0,046–0,298), 0,098 (размах 0,015–0,264) и 0,117 (размах 0,021–0,28). Эти значения несколько ниже содержаний ртути верхней части континентальной земной коры, а диапазон их содержаний не выходит за рамки колебаний содержания ртути в поверхностном слое лесных почв различных стран. Близкие значения получены ранее для почв буроземов на островах Русский и Шкота.

Наблюдается значимая положительная корреляция содержаний ртути в почве и лесной подстилке ($r_k=0,65$) для территории Шандуйских озер. Таким

образом, в составе поверхностного почвенного горизонта отражаются вещественные особенности лесного опада и подстилки. В свете сказанного, различие почв трех рассматриваемых объектов Сихотэ-Алиня по их ртутьности объяснимо неодинаковым количеством в них органогенной составляющей и, что примечательно, ее составом, который отражает ландшафтные особенности местности.

Наблюдаемое уменьшение содержания ртути в разных видах растительности: лишайник (0,135 мг/кг) > папоротник (0,0383 мг/кг) > лабазник (0,023 мг/кг) > осока (0,016 мг/кг), связано со способностью различных видов растений к физиолого-биологическому фиксации водорастворимых форм ртути. Наибольшие содержания ртути в лишайниках и папоротниках связаны с тем, что они имеют более выраженную способность биоаккумулировать ртуть из почвы и атмосферы.

Полученные результаты характеризуют ртутьность в совокупности соседствующих почв, растительного опада и растительности трех приводораздельных участков хребта Сихотэ-Алинь, которые находятся в пределах охраняемых, потенциально геохимических «девственных» природных территорий Приморского края (Национальный парк «Зов тигра», национальный парк «Бикин», Сихотэ-Алиньский государственный биосферный заповедник).

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РНФ № 20-64-47021 и 20-67-47005.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Янин Е.П. Ртуть, человек, окружающая среда: краткий очерк. – М.: Изд-во ИМГРЭ, 2005. – 29 с.
2. 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. 3.
3. Rózański S.L., Castejón J.M.P., Fernández G.G. Bioavailability and mobility of mercury in selected soils profiles // *Environmental Earth Sciences*. – 2016. – V. 75. – № 13 – P. 1–11.
4. Побилат А.Е., Волошин Е.И. Мониторинг микроэлементов в почвах (обзор) // *Микроэлементы в медицине* – 2021. – Т. 22. – № 4. – С. 14–26.
5. Gworek B., Dmuchowski W., Baczewska-Dąbrowska A.H. Mercury in the terrestrial environment: a review // *Environmental Sciences Europe*. – 2020. – V. 32. – № 1. – P. 1–19.
6. Pacyna J.M. Recent advances in mercury research // *The Science of the total environment*. – 2020. – V. 738. – P. 139955.
7. Mercury pollution in vegetables, grains and soils from areas surrounding coal-fired power plants / R. Li, H. Wu, J. Ding, W. Fu, L. Gan, Y. Li // *Scientific reports*. 2017. – V. 7. – № 1. – P. 1–9.
8. Status and environmental management of soil mercury pollution in China: a review / S. Liu, X. Wang, G. Guo, Z. Yan // *Journal of Environmental Management*. – 2021. – V. 277. – P. 111442.
9. Распределение ртути в компонентах окружающей среды горно-рудных районов Республики Алтай / Д.В. Юсупов, Ю.В. Робертус, Л.П. Рихванов, Р.В. Любимов, Е.Е. Ляпина, Е.М. Турсуналиева // *Оптика атмосферы и океана*. – 2018. – Т. 31. – № 1. – С. 73–78.
10. Ртуть в отходах горно-обогатительных предприятий Республики Хакасия / С.В. Азарова, Н.А. Осипова, Е.Е. Ляпина, Е.Г. Язиков // *Ртуть в биосфере: эколого-геохимические аспекты: Третий международный симпозиум*. – Иркутск: Лимнологический институт Сибирского отделения Российской академии наук, 2022. – С. 29–32.
11. Determination, speciation and distribution of mercury in soil in the surroundings of a former chlor-alkali plant: assessment of sequential extraction procedure and analytical technique / T. Frentiu, B. Pintican, S. Butaciu, M. Ironim, M. Ponta, M. Frentiu // *Chemistry Central Journal*. – 2013. – V. 7. – № 1. – P. 1–14.
12. Mercury in soils and plants in an abandoned cinnabar mining area (SW Spain) / A. García-Sánchez, A. Murciegob, E. Alvarez-Ayuso, I. Santa Regina, M.A. Rodríguez-González // *Journal of Hazardous Materials*. – 2009. – V. 168. – № 2–3. – P. 1319–1324.
13. Occurrence, distribution and risk assessment of mercury in multimedia of Soil-Dust-Plants in Shanghai, China / Y. Liu, S. Song, C. Bi, J. Zhao, D. Xi, Z. Su // *International journal of environmental research and public health*. – 2019. – V. 16. – № 17. – P. 3028.
14. Raj D., Maiti S.K. Sources, toxicity, and remediation of mercury: an essence review // *Environmental monitoring and assessment*. – 2019. – V. 191. – № 9. – P. 1–22.
15. Удоденко Ю.Г., Девятова Т.А., Комов В.Т. Ртуть в гидроморфных почвах Воронежского государственного природного биосферного заповедника // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация*. – 2011. – № 2. – С. 148–153.
16. Дзодзикова М.Э. Исследование загрязненности солями тяжелых металлов некоторых участков заповедных территорий в Северной Осетии // *Научные труды государственного природного заповедника «Присурский»*. – 2015. – Т. 30. – № 2. – С. 154–156.
17. Евстафьева Е.В., Богданова А.М. Комплексный анализ содержания ртути в подсистемах окружающей среды Крымского полуострова // *Теоретические основы химической технологии*. – 2021. – Т. 55. – № 4. – С. 452–461.
18. Изучение биогеохимического накопления микроэлементов в почвах и растениях Дальнего Востока / Н.И. Стеблевская, М.А. Медков, В.П. Молчанов, Н.В. Полякова, Л.И. Моисеенко, П.С. Зориков, Н.В. Батырбаева // *Вестник ДВО РАН*. – 2006. – № 2 (126). – С. 57–63.
19. Содержание ртути в почвенно-растительном покрове островов Русский и Шкота (залив Петра Великого, Приморский край) /

- К.С. Ганзей, Н.Ф. Пшеничникова, А.Г. Киселёва, С.Г. Юрченко, И.М. Родникова // Геохимия. – 2021. – Т. 66. – № 5. – С. 473–480.
20. Классификация и диагностика почв России / отв. ред. Г.В. Добровольский. – Смоленск: Ойкумена, 2004. – 342 с.
21. Ващенко И.М., Миронычев К.А., Коничев В.С. Основы почвоведения, земледелия и агрохимии. – М.: Прометей, 2013. – 174 с.
22. Почвы заповедников и национальных парков Российской Федерации. – М.: Фонд «Иносфера» – НИА-Природа, 2012. – 476 с.
23. Origin, baseline contents and vertical distribution of selected trace lithophile elements in soils from nature reserves, Russian Far East / Ya. Timofeeva, Yu. Kosheleva, V. Semal, M. Burdukovskii // Journal of Soils and Sediments. – 2018. – V. 18. – P. 968–982.
24. Паничев А.М., Барановская Н.В. Геофагия как способ выживания растительноядных животных в ландшафтах с аномальным содержанием редкоземельных элементов // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: материалы VI Международной конференции. – Томск, 20–24 сентября 2021. – Томск: Томский политехнический университет, 2021. – Т. 2. – С. 59–63.
25. Язиков Е.Г., Шатилов А.Ю. Геоэкологический мониторинг. – Томск: ТПУ, 2003. – 287 с.
26. ГОСТ 17.4.4.02-2017. Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. – М.: Стандартинформ, 2018. – 14 с.
27. Методика измерений массовой доли общей ртути в пробах почв, грунтов, в том числе тепличных, глин и донных отложений атомно-абсорбционным методом с использованием анализатора ртути РА-915М. ПНД Ф 16.1.2:2.2.80-2013 (М 03-09-2013). URL: <https://www.lumex.ru/> (дата обращения: 24.06.2022).
28. Атомно-абсорбционное определение массовой концентрации ртути в биоматериалах животного и растительного происхождения (пищевых продуктах, кормах и др.). МУК 4.1.1472-03. URL: <https://base.garant.ru/12154259/> (дата обращения: 24.06.2022).
29. Определение элементного состава природных и питьевых вод методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. НСАМ № 480-Х (ред. 2016 г., взамен ред. 2006 г. с изм. № 1 от 13.04.2011 г.).
30. Микроволновая установка пробоподготовки МС-6. Методика подготовки проб. – СПб.: ООО НТФ «ВОЛЬТА», 2016. – 19 с.
31. 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.
32. Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. – Екатеринбург: УрО РАН, 2009. – 383 с.
33. Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants. 4th ed. – USA: CRC Press, 2011. – 505 p.
34. Атомарная ртуть в приземном слое воздуха северо-западной части Японского моря осенью 2011 г. / В.В. Калинин, К.И. Аксентов, М.В. Иванов, Е.А. Лопатников // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. – 2012. – № 3. – С. 58–66.
35. Иванов М.В. Ртутиметрические исследования о. Русский залива Петра Великого Японского моря // Молодой ученый. – 2015. – № 22 (102). – С. 84–87.
36. Mercury isotope compositions across North American forests / W. Zheng, D. Obrist, D. Weis, B.A. Bergquist // Global Biogeochemical Cycles. – 2016. – V. 30. – № 10. – P. 1475–1492.
37. Основные результаты научно-исследовательских работ за 2020 г. – Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2021. – 146 с.
38. Айдинян Р.Х. Содержание и формы соединений серы в различных почвах СССР и ее значение в обмене веществ между почвой и растениями // Агрохимия. – 1964. – № 10. – С. 84–87.
39. Климин М.А., Ри Т.Д., Сиротский С.Е. Валовое содержание ртути в торфяниках Дальнего Востока России // Биогеохимия и гидроэкология наземных и водных экосистем. – Хабаровск: Изд-во ФГБУН Институт водных и экологических проблем ДВО РАН, 2015. – С. 111–118.
40. Tree species affects the concentration of total mercury (Hg) in forest soils: evidence from a forest soil inventory in Poland / P. Gruba, J. Socha, M. Pietrzykowski, D. Pasichnyk // Science of The Total Environment. – 2019. – V. 647. – P. 141–148.
41. Распределение ртути по профилю почв равнинной части Северной Осетии / Н.Г. Зырин, Б.А. Звонарев, Л.К. Садовникова, Н.И. Воронова // Почвоведение. – 1981. – № 9. – С. 40–50.
42. Радченко А.И. Формы нахождения ртути в биосфере // Минералогический журнал. – 1999. – Т. 21. – № 5/6. – С. 48–56.
43. Mercury in the Tapajós River basin, Brazilian Amazon: a review / B.J.J. Nevado, R.C.R. Martín-Doimeadios, F.J.G. Bernardo, M. Jiménez Morenó, A.M. Herculanó, J.L.M. Nascimento, M.E. Crespo-López // Environment International. – 2010. – V. 36. – № 6. – P. 593–600.
44. Добровольский В.В. Основы биогеохимии. – М.: ИЦ «Академия». 2003. – 400 с.
45. Vegetation uptake of mercury and impacts on global cycling / J. Zhou, D. Obrist, A. Dastoor, M. Jiskra, A. Ryjkov // Nature Reviews Earth and Environment. – 2021. – № 2. – P. 269–284.
46. Dastoor A.P., Larocque Y. Global circulation of atmospheric mercury: a modeling study // Atmospheric Environment. – 2004. – № 38. – P. 147–161.
47. Fu X., Feng X., Sommar J. A review of studies on atmospheric mercury in China // Sci. Total Environ. – 2011. – № 421. – P. 73–81.
48. Travníkov O. Atmospheric transport of mercury // Environmental Chemistry and Toxicology of Mercury. – N.Y.: Wiley, 2012. – P. 331–365.
49. Canadian Council of Ministers of the Environment. 2001 Canadian sediment quality guidelines for the protection of aquatic life: summary tables. Updated // Canadian environmental quality guidelines. – Winnipeg: Canadian Council of Ministers of the Environment, 1999.

Поступила 01.07.2022 г.

Прошла рецензирование 25.09.2022 г.

Информация об авторах

Барановская Н.В., доктор биологических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Иванов В.В., кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории микро- и нано исследований, Дальневосточный геологический институт.

Осипова Н.А., кандидат химических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Паничев А.М., доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экологии и охраны животных, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН.

Чекрыжов И.Ю., научный сотрудник лаборатории геохимии, Дальневосточный геологический институт.

Доронина В.Д., аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Хвощевская А.А., кандидат геолого-минералогических наук, доцент заведующая проблемной научно-исследовательской лабораторией гидрогеохимии Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 908.470.40+547

MERCURY IN SOILS AND VEGETATION IN PROTECTED AREAS OF PRIMORSKY KRAI**Natalia V. Baranovskaya¹,**
nata@tpu.ru**Vladimir V. Ivanov²,**
d159327@yandex.ru**Nina A. Osipova¹,**
osipova-nina@yandex.ru**Alexander M. Panichev³,**
sikhote@mail.ru**Igor Yu. Chekryzhov²,**
chekr2004@mail.ru**Valeriya D. Doronina¹,**
vddoronina@mail.ru**Albina A. Khvashchevskaya¹,**
unpc_voda@mail.ru¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.² Far East Geological Institute,
159, 100 let Vladivostoku avenue, Vladivostok, 690022, Russia.³ Pacific Institute of Geography,
7, Radio street, Vladivostok, 690041, Russia.

The relevance. The steady growth in the world of geochemical and ecological studies of mercury in local-regional-planetary plans is associated with the active circulation and omnipresence of its various forms in terrestrial and aquatic environments of biosphere, as well as with its supertoxicity and high biodestructivity. The relevance of this study determines the use of modern tools for highly sensitive analysis in the biogeochemical study of different types of components of the plant-bedding-soil system at three landfills of protected mining areas in the south of the Far East.

The main aim of the research is to establish mercury content in the vegetation and soils of Primorsky Krai.

Objects: soils, vegetation fallout, forest litter, plants of Primorsky Krai.

Methods. Content of the mass fraction of total mercury was determined in International Research Centre «Uranium geology» (TPU) without preliminary chemical decomposition of samples by flame-free atomic absorption spectrometry. Mercury analyzer RA-915+ with pyrolytic prefix RP-91C (Lumex LLC, St. Petersburg) was used.

Results. The obtained results characterize the mercury content of adjacent soils, vegetation fallout and vegetation in a combination of three naturally separate sections of the Sikhote-Alin ridge, which are located within the protected, potentially geochemical «primary» natural territories of the Primorsky Krai. The average mercury content for soils in the vicinity of the Vanchin-Ugolny stream, Shandui lakes and the tributary of the Bikin river was, respectively (mg/kg): 0,162 (range 0,046–0,298), 0,098 (range 0,015–0,264) and 0,117 (range 0,021–0,28). Differences in mercury content in the soils of the studied areas depend on the amount of organogenic component and landscape characteristics of the area. Mercury content in different types of vegetation was: lichen (0,135 mg/kg), fern (0,0383 mg/kg), labaznik (0,023 mg/kg), sedge (0,016 mg/kg), which is explained by the different ability of plants to physiologically and biologically fix water-soluble forms of mercury. Higher mercury content in soils compared to plant litter and vegetation itself is the evidence of long-term accumulation of reserves of this metal and binding of its main mass in organomineral form in soils.

Key words:

biogeochemistry of mercury, soils, vegetation fallout, plants, protected areas, Sikhote-Alin.

The research was financially supported by the RSF grants no. 20-64-47021 and 20-67-47005.

REFERENCES

1. Yanin E.P. *Rtut, chelovek, okruzhayushchaya sreda: kratkiy ocherk* [Mercury, man, environment: brief history]. Moscow, IMGRE Publ., 2005. 29 p.
2. 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. 3.
3. Rózański S.L., Castejón J.M.P., Fernández G.G. Bioavailability and mobility of mercury in selected soils profiles. *Environmental Earth Sciences*, 2016, vol. 75, no. 13, pp. 1–11.
4. Pobilat A.E., Voloshin E I. Monitoring of trace elements in soils (review). *Trace elements in medicine*, 2021, vol. 22, no. 4, pp. 14–26. In Rus.
5. Gworek B., Dmichowski W., Baczevska-Dąbrowska A.H. Mercury in the terrestrial environment: a review. *Environmental Sciences Europe*, 2020, vol. 32, no. 1, pp. 1–19.
6. Pacyna J.M. Recent advances in mercury research. *The Science of the total environment*, 2020, vol. 738, pp. 139955.
7. Li R., Wu H., Ding J., Fu W., Gan L., Li Y. Mercury pollution in vegetables, grains and soils from areas surrounding coal-fired power plants. *Scientific reports*, 2017, vol 7, no. 1, pp. 1–9.
8. Liu S., Wang X., Guo G., Yan Z. Status and environmental management of soil mercury pollution in China: a review. *Journal of Environmental Management*, 2021, vol. 277, pp. 111442.
9. Yusupov D.V., Robertus Yu.V., Rikhvanov L.P., Lyubimov R.V., Lyapina E.E., Tursunaliyeva E.M. Mercury distribution in the environment of mining areas in the Altai Republic (Russia). *Atmospheric Optics*, 2018, vol. 31, no. 1, pp. 73–78. In Rus.
10. Azarova S.V., Lyapina E.E., Osipova N.A., Zazykov E.G. Rtut v otkhodakh gorno-obogatitelnykh predpriyatiy Respubliki Khakassiya [Mercury in the waste of mining and processing enterprises of the Republic of Khakassia]. *Tretiy mezhdunarodny simpozium. Rtut v biosfere: ekologo-geokhimicheskie aspekty* [The third international symposium. Mercury in the biosphere: ecological and ge-

- ochemical aspects]. Irkutsk, Limnological Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2022. pp. 29–32.
11. Frentiu T., Pintican B., Butaciu S., Ironim M., Ponta M., Frentiu M. Determination, speciation and distribution of mercury in soil in the surroundings of a former chlor-alkali plant: assessment of sequential extraction procedure and analytical technique. *Chemistry Central Journal*, 2013, vol. 7, no. 1, pp. 1–14.
 12. García-Sánchez A., Murciegob A., Álvarez-Ayuso E., Santa Regina I., Rodríguez-González M.A. Mercury in soils and plants in an abandoned cinnabar mining area (SW Spain). *Journal of Hazardous Materials*, 2009, vol. 168, no. 2–3, pp. 1319–1324.
 13. Liu Y., Song S., Bi C., Zhao J., Xi D., Su Z. Occurrence, distribution and risk assessment of mercury in multimedia of Soil-Dust-Plants in Shanghai, China. *International journal of environmental research and public health*, 2019, vol. 16, no. 17, pp. 3028.
 14. Raj D., Maiti S.K. Sources, toxicity, and remediation of mercury: an essence review. *Environmental monitoring and assessment*, 2019, vol. 191, no. 9, pp. 1–22.
 15. Udodenko Yu.G. Mercury in hydromorphic soils of the Voronezh State Natural Biosphere Reserve. *Bulletin of the Voronezh State University. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy*, 2011, no. 2, pp. 148–153. In Rus.
 16. Dzdovikova M.E. The study of contamination by salts of heavy metals of some part of protected areas in North Ossetia. *Scientific works of the state nature reserve «Prisursky»*, 2015, vol. 30, no. 2, pp. 154–157. In Rus
 17. Evstafieva E.V., Bogdanova A.M. Kompleksny analiz sodержaniya rtuti v podsystemakh okruzhayushchey sredy Krymskogo poluostrova [Comprehensive analysis of mercury content in environmental subsystems of the Crimean Peninsula]. *Theoretical foundations of chemical technology*, 2021, vol. 55, no. 4, pp. 452–461.
 18. Steblevskaya N.I., Medkov M.A., Molchanov V.P., Polyakova N.V., Moiseenko L.I. Study of biogeochemical accumulation of trace elements in soils and plants of the Far East. *Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2006, vol. 2 (126), pp. 57–63. In Rus.
 19. Ganzei K.S., Pshenichnikova N.F., Kiseleva A.G., Yurchenko S.G., Rodnikova I.M. Soderzhanie rtuti v pochvenno-rastitelnom pokrove ostrovov Russkii i Shkota [Mercury content in the soil and vegetation cover of the Russian and Shkota Islands (Peter the Great Bay, Primorsky Krai)]. *Geokhimiya*, 2021, vol. 66, no. 5, pp. 473–480.
 20. Dobrovolsky G.V. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* [Classification and diagnostics of soils in Russia]. Smolensk, Oikumena Pbl., 2004. 342 p.
 21. Vaschenko I.M., Mironichev K.A., Konichev V.C. *Osnovy pochvovedeniya, zemledeliya i agrokhimii* [Fundamentals of soil science, agriculture and agrochemistry]. Moscow, Prometheus Publ., 2013. 174 p.
 22. Pochvy zapovednikov i natsionalnykh parkov Rossiyskoy Federatsii [Soils of nature reserves and national parks of the Russian Federation]. Moscow, Fond «Inocfera»-NIA- Priroda Publ., 2012. 476 p.
 23. Timofeeva Ya.O., Kosheleva Yu., Semal V., Burdukovskii M. Origin, baseline contents and vertical distribution of selected trace lithophile elements in soils from nature reserves. *Russian Far East. Journal of Soils and Sediments*, 2018, vol. 18, pp. 968–982. In Rus.
 24. Panichev A.M., Baranovskaya N.V. Geofagiya kak sposob vyzhivzniya rastitelnoyadnykh zhivotnykh v landshaftakh s anomalnym sodержaniem redkozemelnykh elementov [Geophagy as a way of survival of herbivorous animals in landscapes with abnormal content of rare earth elements]. *Radioaktivnost i radioaktivnye elementy v srede obitaniya cheloveka. Materialy VI Mezhdunarodnoy konferentsii* [Radioactivity and radioactive elements in the human environment. Proceedings of the VI International Conference]. Tomsk, 20–24 September 2021. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2021. Vol. 2, pp. 59–63.
 25. Yazikov E.G., Shatilov A.Yu. *Geoekologicheskii monitoring* [Geoeological monitoring]. Tomsk, TPU Publ., 2003. 287 p.
 26. GOST 17.4.4.02-2017. *Mezhgosudarstvenny standart. Okhrana prirody. Pochvy. Metody otbora i podgotovki prob dlya khimicheskogo, bakteriologicheskogo, gelmintologicheskogo analiza* [State standard 17.4.4.02-2017. Interstate standard. Nature conservation. Soils. Methods of sampling and preparation of samples for chemical, bacteriological, helminthological analysis]. Moscow, StandardInform Publ., 2018. 14 p.
 27. *Metodika izmereniy massovoy doli obshchey rtuti v probakh pochv, gruntov, v tom chisle teplichnykh, glin i donnykh otlozheniy atomno-absorbtsionnym metodom s ispolzovaniem analizatora rtuti RA-915M. PND F 16.1.2:2.2.80-2013 (M 03-09-2013)* [The method of measuring the mass fraction of total mercury in samples of soils, soils, including greenhouses, clays and bottom sediments by atomic absorption method using the mercury analyzer RA-915M. PND F 16.1.2:2.2.80-2013 (M 03-09-2013)]. Available at: <https://www.lumex.ru/> (accessed: 24 June 2022).
 28. *Atomno-absorbtsionnoe opredelenie massovoy kontsentratsii rtuti v biomaterialakh zhivotnogo i rastitel'nogo proiskhozhdeniya (pishchevykh produktakh, kormakh i dr. MUK 4.1.1472-03)* [Atomic absorption determination of mercury mass concentration in biomaterials of animal and vegetable origin (food waste, feed etc.). MUK 4.1.1472-03]. Available at: <https://www.lumex.ru/> (accessed: 24 June 2022).
 29. *Opredelenie elementnogo sostava prirodnykh i pitevykh vod metodom mass-spektrometrii s induktivno-svyazannoy plazmoy. NSAM №480-X* [Determination of the elemental composition of natural and drinking waters by inductively coupled plasma mass spectrometry. NSAM № 480-X].
 30. *Mikrovolnovaya ustanovka probopodgotovki MS-6. Metodika podgotovki prob* [Microwave sample preparation unit MS-6. Methods of sample preparation]. St-Petersburg, OOO NTF «VOLTA» Publ., 2016. 19 p.
 31. Kasimov N.S., Vlasov D.V. Clarks of chemical elements as reference standards in ecogeochemistry. *Bulletin of the Moscow University. Series 5. Geography*, 2015, vol. 2, pp. 7–17.
 32. Grigorev N.A. *Raspredeleeniye khimicheskikh elementov v verkhney chasti kontinentalnoy kory* [Distribution of chemical elements in the upper part of the continental crust]. Ekaterinburg, RAN Publ., 2009. 383 p.
 33. Kabata-Pendias A. *Trace elements in soils and plants*. 4th ed. USA, CRC Press, 2011. 505 p.
 34. Kalinchuk V.V., Aksentov K.I., Ivanov M.V., Lopatnikov E.A. Atomic mercury in a surface layer of air in the northwestern part of the Sea of Japan in autumn 2011. *Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2012, vol. 3, pp. 58–66. In Rus.
 35. Ivanov M.V. *Rtutometricheskie issledovaniya o. Russkiy zaliva Petra Velikogo Yaponskogo moray* [Mercury studies of Russky Island of Peter the Great Bay of the Sea of Japan]. *XXII Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya (shkola) po morskoy geologii. Geologiya morey i okeanov* [XXII International scientific conference (school) on marine geology. Geology of the seas and oceans]. Moscow, Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences P.P. Shirshov Publ., 2017. pp. 307–311.
 36. Zheng W., Obrist D., Weis D., Bergquist B.A. Mercury isotope compositions across North American forests. *Global Biogeochemical Cycles*, 2016, vol. 30, no. 10, pp. 14751492.
 37. *Osnovnye rezultaty nauchno-issledovatel'skikh rabot za 2020 g.* [The main results of research work for 2020]. Vladivostok, TOI FEB RAS Publ., 2021. 146 p.
 38. Aydinyan R.H. Soderzhanie i formy soedineniy sery v razlichnykh pochvakh SSSR i ee znachenie v obmene veshchestv mezhdu pochvoy i rasteniyami [The content and forms of sulfur compounds in various soils of the USSR and its significance in the metabolism between soil and plants]. *Agrokhimiya*, 1964, no. 10, pp. 84–87.
 39. Klimin M.A., Ri T.D., Sirotskiy S.E. Valovoe sodержanie rtuti v torfyanikakh Dalnego Vostoka Rossii [Gross mercury content in the peat bogs of the Russian Far East]. *Biogekhimiya i gidroekologiya nazemnykh i vodnykh ekosistem* [Biogeochemistry and hydrogeology of terrestrial and water ecosystems]. Khabarovsk, Institute of water and ecological problems FEB RAS Publ., 2015. pp. 111–118.
 40. Gruba P., Socha J., Pietrzykowski M., Pasichnyk D. Tree species affects the concentration of total mercury (Hg) in forest soils: evidence from a forest soil inventory in Poland. *Science of The Total Environment*, 2019, vol. 647, pp. 141–148.
 41. Zyrin N.G., Zvonarev B.A., Sadovnikova L.K., Voronova N.I. *Raspredeleeniye rtuti po profilyu pochv ravninnoy chasti Severnoy*

- Osetii [Distribution of mercury in the soil profile of the lowland part of North Ossetia]. *Pochvovedenie*, 1981, vol. 9, pp. 40–50.
42. Radchenko A.I. Formy nakhozheniya rtuti v biosfere [Forms of mercury in the biosphere]. *Mineralogicheskiy zhurnal*, 1999, vol. 21, no. 5–6, pp. 48–56.
43. Nevado B.J. J., Martín-Doimeadios R.C.R., Bernardo F.J.G. Mercury in the Tapajós River basin, Brazilian Amazon: a review. *Environment International*, 2010, vol. 36, no. 6 pp. 593–600.
44. Dobrovolsky V.V. *Osnovy biogeokhimii* [Fundamentals of Biogeochemistry]. Moscow, Akademiya Publ. house, 2003. 400 p.
45. Zhou J., Obrist D., Dastoor A., Jiskra M., Ryjkov A. Vegetation uptake of mercury and impacts on global cycling. *Nature Reviews Earth and Environment*, 2021, no. 2, pp. 269–284.
46. Dastoor A.P., Larocque Y. Global circulation of atmospheric mercury: a modeling study. *Atmospheric Environment*, 2004, no. 38, pp. 147–161.
47. Fu X., Feng X., Sommar J. A review of studies on atmospheric mercury in China. *Sci. Total Environ.*, 2011, no. 42, pp. 73–81.
48. Travnikov O. Atmospheric transport of mercury. *Environmental Chemistry and Toxicology of Mercury*. N.Y., Wiley, 2012. pp. 331–365.
49. Canadian Council of Ministers of the Environment. 2001 Canadian sediment quality guidelines for the protection of aquatic life: summary tables. Updated. *Canadian environmental quality guidelines*. Winnipeg, Canadian Council of Ministers of the Environment, 1999.

Received: 1 July 2022.
Reviewed 25 September 2022.

Information about the authors

Natalia V. Baranovskaya, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Vladimir V. Ivanov, Cand Sc., head of Laboratory of Micro- and Nanoscale Researches, Far East Geological Institute FEB RAS.

Nina A. Osipova, Cand. Sc, associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexander M. Panichev, Dr. Sc., leading researcher, Pacific Institute of Geography FEB RAS.

Igor Yu. Chekryzhov, researcher, Far East Geological Institute FEB RAS.

Valeriya D. Doronina, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Albina A. Khvashchevskaya, Cand. Sc., head of the scientific laboratory, National Research Tomsk Polytechnic University.