УДК 550.4

Геоэкологические и геохимические особенности накопления Hg почвами Северо-Запада Алтайского края

Ляпина Е.Е.

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

DOI: 10.18522/2308-9709-2023-46-2

Аннотация

В статье приводятся оригинальные данные о валовой концентрации ртути в типичных почвах степных, лесостепных районов Северо-Запада Алтайского края. Среднее содержание элемента для всех исследованных почв находится на уровне показателя для почв Земли и может использоваться в геоэкологических и геохимических исследованиях как фоновое. Выявлены особенности распределения концентраций ртути в почвенных профилях в зависимости от гранулометрического состава, водородного показателя, электропроводности и магнитной восприимчивости. В исследованных почвах содержание ртути в приповерхностной части (10–15 см) профиля увеличивается с уменьшением фракции почвы. По всей глубине колонки почв максимальные концентрации Hg приходятся на самую мелкую фракцию (крупная пыль). Содержание ртути снижается с увеличением электропроводности и в более щелочных условиях. Повышение доли песка в составе почв снижает величину магнитной восприимчивости и электропроводности почвенной вытяжки. При росте величины магнитной восприимчивости концентрации элемента увеличиваются. Содержание ртути в профилях связаны с наличием глинистых частиц и возрастают со смещением реакции почвенной вытяжки в сторону окисления. Определены формы нахождения ртути в почвенных профилях: наибольшая доля элемента приходится на формы, испаряющиеся в температурном диапазоне 170–400 °C, т.е. высоколетучие низкомолекулярные ртутьорганические соединения, $HgCH_3$, $Hg(CH_3)_2$, $HgCl_2$, алкильные радикалы HgS, арильные радикалы, а также в составе органокомплексов. Данные формы наиболее доступные и токсичные для живых организмов, доля недоступных и инертных форм минимальна. В поверхностной составляющей всех исследованных почв превалируют низкотемпературные соединения ртути. С глубиной соотношение форм меняется в сторону увеличения доли элемента, связанной с органическим веществом, а также химически сорбированной.

Ключевые слова: ртуть, почва, формы нахождения, Алтайский край, геохимия, геоэкология

Geoecological and geochemical features of Hg accumulation in soils of the North-West of the Altai Region

Lyapina E.E.

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the

Russian Academy of Sciences (IMCES SB RAS), Tomsk

DOI: 10.18522/2308-9709-2023-46-2

Abstract

The article provides original data on the gross concentration of mercury in typical soils of steppe and forest-steppe regions of the north-west of the Altai Region. The average content of the element for all studied soils is at the level of the indicator for the soils of the Earth and can be used in geoecological and geochemical studies as background. Features of the distribution of mercury concentrations in soil profiles were revealed depending on the particle size distribution, pH value, electrical conductivity and magnetic susceptibility. In the studied soils, the mercury content in the near-surface part (10-15 cm) of the profile increases with a decrease in the soil fraction. Throughout the entire depth of the soil column, the maximum Hg concentrations occur in the finest fraction (coarse dust). Mercury content decreases with increasing electrical conductivity and under more alkaline conditions. An increase in the proportion of sand in the soil composition reduces the magnetic susceptibility and electrical conductivity of the soil extract. As the magnetic susceptibility increases, the concentrations of the element increase. The mercury content in profiles is associated with the presence of clay particles and increases with a shift in the reaction of soil extract towards oxidation. The forms of mercury in soil profiles have been determined: the largest share of the element is in forms that evaporate in the temperature range of 170-400^{0}C, i.e. highly volatile low molecular weight organomercury compounds, HgCH3, $Hg(CH_3)_2$, $HgCl_2$, alkyl radicals HgS, aryl radicals, and also as part of organocomplexes. These forms are the most accessible and toxic for living organisms; the proportion of inaccessible and inert forms is minimal. Low-temperature mercury compounds prevail in the surface component of all studied soils. With depth, the ratio of forms changes towards an increase in the proportion of the element associated with organic matter, as well as chemically sorbed.

Key words: mercury, soil, forms of occurrence, geochemistry, the Altai Region, geoecology

Введение

Исследование содержания и особенностей накопления и перераспределения поллютантов в почвах – важная задача геоэкологии и геохимии. Почва является долговременной депонирующей средой и важнейшим компонентом биосферы, находясь на пересечении путей миграции химических элементов (Gómez-Armesto, 2020).

В сельскохозяйственные почвы поллютанты попадают с внесением минеральных и органических удобрений, мелиорантов, средств защиты растений. Степень токсичного воздействия тяжелых металлов зависит от форм их нахождения в составе почв: степени окисления, характера связи с минеральными и органическими носителями и др. Основную роль в закреплении поллютантов почвами играют гумусовые вещества, глинистые минералы, оксиды марганца и железа (Водяницкий, 2012). Основным негативным воздействием тяжелых металлов на почвы является снижение ее биологической активности. Поллютанты в небольших концентрациях увеличивают микробиологическую активность, усиливают дыхание почв и выделение CO_2, при этом снижая азотфиксацию и дегидрогеназную активность, что негативно сказывается на плодородии почв и содержании гумуса (Cheng, 2023).

Согласно (СанПиН 1.2.3685-21) ртуть является высоко опасным элементом, относится к I классу опасности и строго контролируется в компонентах окружающей среды (Yang, 2022; Rashid, 2023). При всех путях поступления ртуть в почвах аккумулируется органическим веществом, глинистыми частицами, может поглощаться растительностью, в том числе сельскохозяйственной, а также выделяться в виде паров и в составе пыли в атмосферу, мигрировать вниз по почвенному профилю и поступать в грунтовые воды (Водяницкий, 2012; Gómez-Armesto, 2021; Chongchong Qi, 2022; Rongguo Sun, 2023). Ртуть в черноземах снижает активность фермента целлюлозы, что в свою очередь, уменьшает поступление органических компонентов в почву, служащих для воспроизводства гумуса (Водяницкий, 2012). Максимальные концентрации приурочены, как правило, к верхним горизонтам и обычно снижаются с глубиной (Wang, 2021). Миграция металла вниз по профилю почв обусловлена физико-техническими свойствами почв, формой нахождения металла и др. Концентрации Hg в почвах фоновых территорий варьируют в диапазоне 0,01–0,1 мг/кг. Для почв Сибири установлены уровни ртути в пределах 0,005–1,275 мг/кг (Аношин, 1995).

Целью данной работы является выявление содержания и особенностей распределения ртути в профилях типичных почв Алтайского края.

Материалы и методы

На территории Северо-Запада Алтайского края пробы почвы отбирали в период с 2016 по 2022 г. Алтайский край является крупным аграрным регионом России, в котором традиционно ведется сельскохозяйственная деятельность, соляной промысел. Промышленность в районе исследования представлена деятельностью предприятий пищевой, химической, топливо-энергетической отраслей (Звонарев, 1982). Антропогенную нагрузку на территорию исследования оказывает деятельность ОАО «Алтайхимпром» (г. Яровое), в качестве объектов накопленного вреда в государственном реестре Минприроды России (Попрядухин, 2017), а также крупные автомобильные и железные дороги, населенные пункты (отсутствие централизованной системы водоотведения, свалки ТБО, отходы фермерских хозяйств), а также многолетнее внесение удобрений, фунгицидов и гербицидов (в том числе гранозана). Следует отметить, что южная часть Западно-Сибирского экономического района подвержена влиянию промышленных районов Казахстана (Павлодар, Экибастуз и Усть-Каменогорск). Одновременно промышленный пояс юга Сибири оказывает влияние на территорию Республики Казахстан (Клюев, 2001; Попрядухин, 2017; Робертус, 2016).

Отбор проб грунта проводился методом шурфа, согласно (ГОСТ 17.4.02-84) с интервалом опробования 5 см. Всего отобраны пробы почв 8-и разрезов в лесостепной и степной зонах. В лесостепной зоне заложено три разреза глубиной 0,9 м возле с. Добровольщина (далее «Добровольщина»); 1,2 м возле оз. Кулундинское («Кулундинское»); 0,75 м возле оз. Хорошее («Хорошее»). В степной зоне было заложено 5 разрезов, их глубины: 1,0 м возле оз. Песчаное («Песчаное»); 1,0 м возле оз. Малое Яровое («М. Яровое»); 1,5 м возле оз. Большое Яровое («Б. Яровое»); 0,75 м в районе добычи поваренной соли возле оз. Бурлинское (далее «Бурлинское»); 0,9 м в районе с. Балластный Карьер («Б. Карьер»). Пробы почвы отбирали послойно с интервалом 5 см, в каждом слое отбирали 3 повторности, из которых формировалась средняя проба. Вес каждой пробы составлял примерно 500 г. Пробы высушивали при комнатной температуре до постоянной массы, измельчали и просеивали через сито, диаметр ячеек которого 1 мм.

Почвы были диагностированы как черноземы южные и темно-каштановые, а также как черноземы южные солонцеватые и солончаки луговые (Важов, 2013; Звонарев, 1982). Рельеф местности равнинный.

Изучение проб осуществляли на базе Инженерной школы природных ресурсов научно исследовательского Томского политехнического университета. Содержание ртути в пробах определяли на анализаторе ртути РА-915+, методом атомной абсорбции с помощью приставки ПИРО-915 (метод пиролиза; предел обнаружения Hg – 5 нг/г), согласно (ПНД Ф 16.1:2:2.2.80-2013). Точность анализа – 5 нг/г, содержание ртути в пробах рассчитывали на 1 г сухого вещества, масса навески 50 мг. Определение форм нахождения элемента в пробах почв проводили методом термодесорбции на том же приборе (Маликова, 2017; Никулина, 2013; Радченко, 1999; Malikova, 2008).

Так же были определены pH и электропроводность водной вытяжки почв, и магнитная восприимчивость. Гранулометрический анализ почв выполнен при помощи лабораторных сит диаметром 1; 0,5; 0,25; 0,125; 0,1; 0,04 мм.

Для оценки уровня накопления ртути почвами применили эколого-геохимических показатели:

Кс – коэффициент концентрации относительно фона

$Кс=C_{Hg}/C_{ф}$, (1), где C_{Hg} – концентрация ртути в пробе, нг/г; Сф – фоновая концентрация ртути, нг/г (21 нг/г, среднее для черноземов Кулундинской степи (Ильин, 2003);

Кпдк – относительно предельно допустимой концентрации

$Кпдк=C_{Hg}/ПДК$, (2), где, C_{Hg} – концентрация ртути в пробе, нг/г; ПДК – предельно-допустимая концентрация ртути в почве (2100 нг/г (СанПиН 1.2.3685-21);

Кк – кларк концентрации относительно земной коры

$Кк=C_{Hg}/К_{Hg}$, (3), где, C_{Hg} – концентрация ртути в пробе, нг/г; $К_{Hg}$ – кларк ртути в земной коре (65 нг/г, по Григорьеву, 2009) (Касимов, 2015);

Кпз – кларк концентрации относительно почв Земли:

$Кпз=C_{Hg}/C_{Hg}пз$, (4), где, C_{Hg} – концентрация ртути в пробе, нг/г; $C_{Hg}пз$ – концентрация ртути в почвах Земли (10 нг/г (Касимов, 2015));

Fe – фактор обогащения (нормирование по Sc, собственные данные):

$Fe=(C_{Hg}/К_{Hg})/(C_{Sc}/K_{Sc})$, (5), где, C_{Hg} – концентрация ртути в пробе, нг/г; $К_{Hg}$ – кларк ртути в земной коре (65 нг/г, по Григорьеву, 2009);

C_{Sc} – концентрация скандия в почве, мг/кг; K_{Sc} – кларк скандия в земной коре (10 мг/кг (Касимов, 2015));

R – показатель профильного распределения ртути в почве (собственные данные):

$R=C_{Hg}70–100$ см$/C_{Hg}0$-20 см (6), где, C_{Hg} – концентрация ртути в горизонтах 70–100 и 0–20 см, нг/г.

Статистическая обработка результатов исследования проводилась с использованием пакета Statistica.

Результаты и обсуждения

Концентрации ртути в почвах Северо-Запада Алтайского края изменяются в широких интервалах: «Добровольщина» 4–11; «Песчаное» 2–13; «Хорошее» 3–12; «Бурлинское» 5–20; «Б. Карьер» 2–20; «М. Яровое» 3–22; «Б. Яровое» 2–20; «Кулундинское» 2–8 нг/г (рис. 1). При этом распределение элемента носит неравномерный характер (42–76%), за исключением точек «Добровольщина» и «Песчаное» (33 и 38%, соответственно), что подтверждается данными расчета коэффициента вариации.

Профили всех исследованных почв имеют похожий вид: максимальные концентрации ртути отмечаются в верхних 20 см профиля с последующим снижением вниз по почвенному профилю. Исключение составляет только почвенный разрез «М. Яровое», где максимальные концентрации выявлены на глубине 50 см. Среднее содержание ртути в пробах почв, отобранных на территории Северо-Запада Алтайского края, составляет 7 нг/г, в слое 0–10 см – 10 нг/г.

Похожий характер распределения ртути в почвенных профилях отмечен во всех исследованных точках (рис. 2), что подтверждается результатами корреляционного анализ (r =0,5; P=0,05), исключение составляет профиль «Песчаное». Все связи характеризуются положительным знаком, кроме «Б. Яровое» – «М. Яровое» – «Б. Карьер». В верхних 0–10 см наибольшие связи установлены также практически во всех точках (r =0,95; P=0,05), за исключением «Б. Карьер». Взаимосвязи также положительны, кроме «Б. Яровое» – «Хорошее», «Добровольщина» – «Бурлинское».

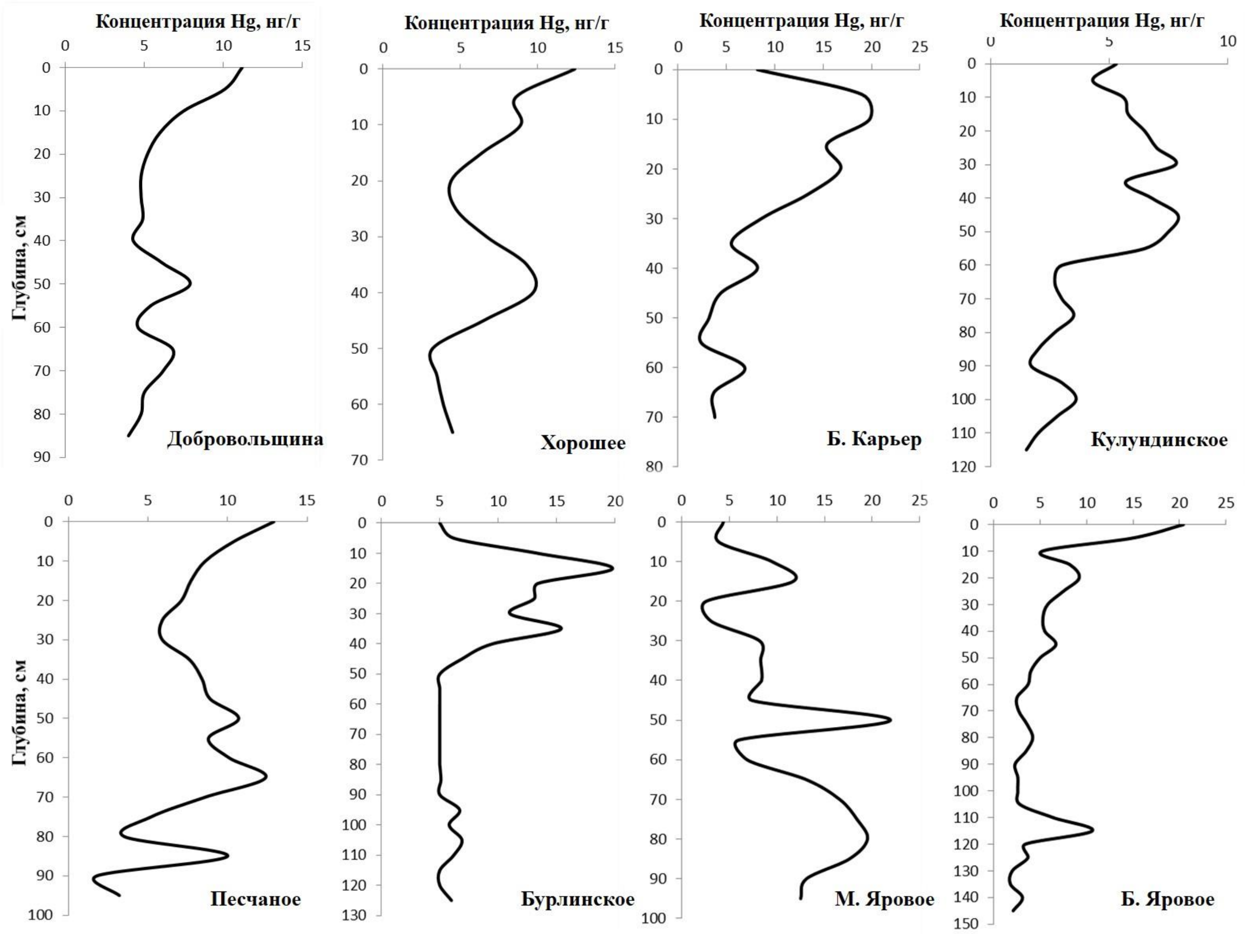

Рис. 1 – Распределение содержания ртути в почвах Северо-Запада Алтайского края

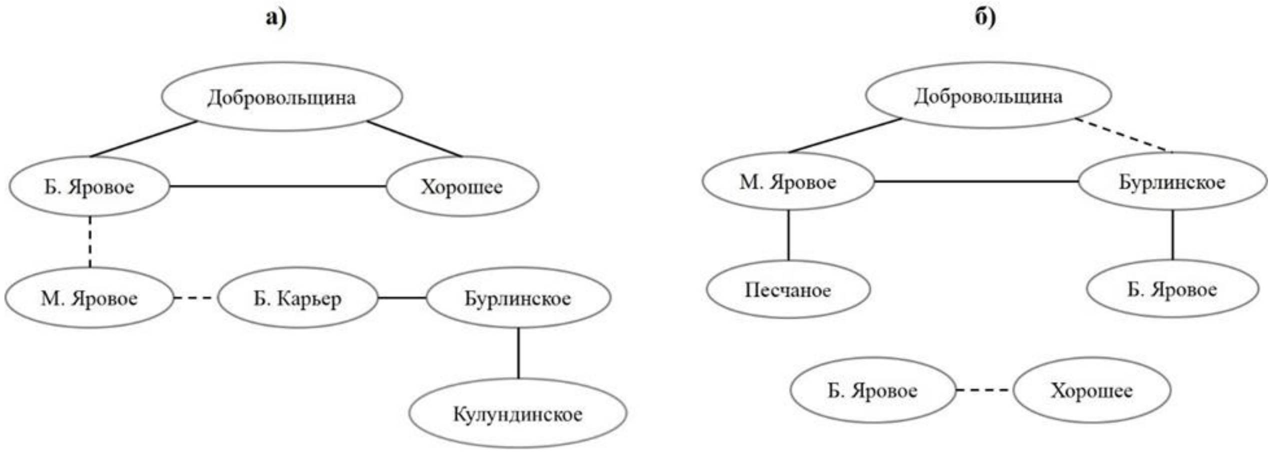

Рис. 2 – Графы ассоциации ртути почвах Северо-Запада Алтайского края: а) в почвенном профиле (r 0,5; P=0,05); б) в верхних 0–10 см (r= 0,95; P=0,05); сплошная линия – положительная, пунктир – отрицательная вязь

Для подтверждения выявленных взаимосвязей были проведены дополнительные расчёты. Так, с помощь факторного анализа выявили три фактора, оказывающих влияние на накопление и распределение ртути в почвенных колонках, суммарное воздействие которых составляет 78,8%. Факторы 1 (36,1%) и 2 (30%) снижают аккумуляцию ртути почвами в разрезах «Добровольщина», «Песчаное» и «Б. Карьер», соответственно. Фактор 3 (12,7%) способствует накоплению элемента в профиле «Кулундинское». Дендрограмма корреляционной матрицы (метод Варда) объединила исследованные профили в группу «Б Яровое» – «Добровольщина». По результатам статистических расчётов похожим характером накопления ртути отмечаются почвы разрезов «Добровольщина» и «Б. Яровое» как в верхних 0–10 см, так и на всю глубину почвенного профиля.

Исследования по выявлению зависимости накопления Hg от окислительно-восстановительных условий, электропроводности и магнитной восприимчивости проводили в пробах почв из разрезов «Добровольщина» и Песчаное по всей глубине почвенного профиля. Гранулометрический состав оказывает влияние на содержание элемента в горизонтах 10–15; 35–40; 45–60; 80–90 см. При этом, на глубине 10–15 см в разрезе «Добровольщина» и 85–90 см в разрезе «Песчаное» концентрации Hg увеличиваются с уменьшением диаметра гранулометрической фракции почвы, что подтверждается результатами расчета коэффициента корреляции (r= 0,5÷0,6; P=0,05). Полученные результаты согласуются с данными, приведенными в исследованиях (Питиримов, 2014). В остальных отмеченных горизонтах исследованных профилей картина противоположная (r= -0,5÷-0,9; P=0,05), что согласуется с данными для сельскохозяйственных почв Китая (Penggang Pei, 2021). Максимальные концентрации Hg отмечаются в самой мелкой фракции >0,04 мм (крупная пыль по Качинскому, 1958): «Добровольщина» (72%) и «Песчаное» (90%), доля которых 10÷30 и 4÷23%, соответственно.

Концентрации ртути в почвенном профиле точки «Добровольщина» участков снижаются с увеличением электропроводности и в более щелочных условиях. Причем, повышение доли песка в составе почв снижает величину магнитной восприимчивости и электропроводности почвенной вытяжки, что также отмечено в пробах разреза «Песчаное». При увеличении магнитной восприимчивости концентрации элемента увеличиваются, что является свидетельством наличия связи с другими металлами, например, металлами-сидерофилами: Ni, Cr, Zn (Водяницкий, 2012). Концентрации ртути в профилях связаны с наличием глинистых частиц и растут со смещением реакции почвенной вытяжки в кислую сторону. Ртуть проявляет преимущественно физическую адсорбцию на глинистых минералах (Chongchong Qi, 2020).

Почвы Алтайского края характеризуются преобладающим нахождением в почвах в составе органических комплексов (Hg_2Cl_2, $HgCl_2$, HgS, HgSe, Hg^0 и амальгамы с металлами, Hg^{2+}-комплексы) и химически связанная форма (HgS, HgO, $HgSO_4$) (табл. 1). Второе место занимают свободная и физически связанная форма (HgO, $HgCH_3$, $Hg(CH_3)_2$, $MeHgCl$, $EtHgCl$, $Hg(OH)_2$. $Hg (NO_3)_2$. $HgSO_4$). Доля изоморфной формы (в составе кристаллической решетки минералов) минимальна. В поверхностной составляющей всех исследованных почв превалирует низкотемпературная форма (6 участков из 8), что связано с систематическим внесением органических удобрений. Концентрация Hg(0) в почве, которая определяется трансформацией степени окисления ртути в почве, является важным фактором, влияющим на высвобождение элементарной ртути через границу раздела почва-воздух. После внесения в почву органических удобрений, органические вещества могут напрямую адсорбировать почвенную Hg(0), в результате чего способность удаления Hg(0) снижается (Rongguo Sun, 2023). С глубиной соотношение форм меняется в сторону увеличения доли элемента, связанной с органическим веществом (Gómez-Armesto, 2021), а также химически связанная. В нижней части почвенного профиля увеличивается доля ртути в составе кристаллической решетки минералов. В засоленных почвах Алтайского края по профилю преобладают формы элемента, испаряющиеся в интервале температур 300–400 ˚С. В богатых гумусом южных черноземах Алтайского края преобладают соединения Hg, связанные с органическим веществом почв, гуминовыми кислотами и фульвокислотами на всю глубину разреза.

Таблица 1 – Формы нахождения ртути в почвах Северо-Запада Алтайского края

Разрезы	Формы нахождения ртути, %		
	свободная и физически связанная (170–230 ˚С)	органокомплексы и химически связанная (300–400 ˚С)	Изоморфная (850–1000 ˚С)
Добровольщина	1–41	37–79	19–63
Песчаное	1–3	1–96	4–99
Хорошее	15–62	18–40	20–58

Бурлинское	1–24	21–60	36–71
Б. Карьер	29–54	25–49	19–39
М. Яровое	2–59	21–46	20–64
Б. Яровое	1–3	21–76	24–79
Кулундинское	1–3	48–54	46–52

Расчёты эколого-геохимических особенностей накопления ртути типичными почвами Северо-Запада Алтайского края показали отсутствие превышения среднего содержания ртути над средним значением для черноземов Кулундинской степи (21 нг/г) (табл. 2). Расчет показателя профильного распределения ртути в почве подтвердил классический вид кривой ртути во всех исследованных почвенных профилях, за исключением точки «М. Яровое». Однако различные исследования продемонстрировали существование резервуаров с высоким содержанием ртути в подповерхностных слоях почвы (т.е. на глубине >50 см), связанных с различными почвенными соединениями, такими как комплексы металлов (Al, Fe)-гумус и оксигидроксиды Al и Fe (Gómez-Armesto, 2021). Все полученные концентрации ртути ниже ПДК (2100 нг/г) и кларка земной коры (45 нг/г), однако превышают значения относительно кларка почв Земли (10 нг/г). Расчеты также не подтверждают обогащение почв ртутью (значения показателя Fe). Средние концентрации элемента для всех исследованных почв находятся на уровне кларка для почв Земли и могут использоваться в геоэкологических и геохимических исследованиях как фоновые.

Таблица 2 – Геоэкологические показатели ртутной нагрузки на поверхностную составляющую (0–10 см) почв Северо-Запада Алтайского края

Разрезы	C_{Hg}, нг/г	Кс**	Кк	Кпдк	Кпз	Fe	R
Добровольщина	10±0,5*	0,46	0,15	0,005	0,96	0,19	0,6
Песчаное	11±0,7	0,51	0,16	0,01	1,06	0,29	0,6
Хорошее	10±0,4	0,47	0,15	0,01	1,00	0,29	0,6

Бурлинское	8±0,7	0,39	0,13	0,004	0,82	0,32	0,5
Б. Карьер	14±0,4	0,69	0,22	0,01	1,44	0,23	0,2
М. Яровое	6±0,4	0,28	0,09	0,003	0,59	0,10	2,5
Б. Яровое	14±1,2	0,64	0,21	0,01	1,35	0,30	0,3
Кулундинское	6±0,4	0,24	0,08	0,002	0,51	0,16	0,5

Примечание: * – концентрация Hg ±СКО, нг/г; ** - см. материалы и методы

Заключение

Средние концентрации элемента для всех исследованных почв Северо-Запада Алтайского края находятся на уровне кларка для почв Земли и могут использоваться в геоэкологических и геохимических исследованиях как фоновые.

В исследованных почвах концентрации ртути в приповерхностной части (10–15 см) профиля увеличиваются с уменьшением фракции почвы (от 1 до 0,04 мм). По всей глубине колонки почв максимальное содержание ртути приходятся на самую мелкую фракцию (крупная пыль). Концентрации элемента снижаются с ростом электропроводности и в более щелочных условиях. Повышение доли песка в составе почв снижает величину магнитной восприимчивости и электропроводности почвенной вытяжки.

С ростом магнитной восприимчивости концентрации элемента увеличиваются. Содержание ртути в профилях связаны с наличием глинистых частиц и повышаются со смещением реакции почвенной вытяжки в сторону окисления.

В почвенных профилях исследованных почв наибольшая доля ртути приходится на формы, испаряющиеся в температурном диапазоне 170–400 ˚С, т.е. высоколетучие низкомолекулярные ртутьорганические соединения, $HgCH_3$, $Hg(CH_3)_2$), $HgCl_2$, алкильные радикалы HgS, арильные радикалы, а также в составе органокомплексов. Данные формы наиболее доступные и токсичные для живых организмов, доля недоступных и инертных форм минимальна. В поверхностных горизонтах всех исследованных почв превалируют низкотемпературные соединения ртути.

С глубиной соотношение форм меняется в сторону увеличения доли элемента, связанной с органическим веществом, а также химически сорбированной.

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

Литература

1. Аношин Г.Н., Маликова И.Н., Ковалев С.И. и др. Ртуть в окружающей среде юга Западной Сибири // Химия в интересах устойчивого развития, 1995. Т.3, № 1–2. С. 69–111.
2. Важов В.М. Гречиха на полях Алтая: монография / М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2013. 188 с.
3. Водяницкий Ю.Н., Лядонин Д.В., Савичев А.Т. Загрязнение почв тяжелыми металлами. М., 2012. 305 с.
4. ГОСТ 17.4.02-84. "Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа" М., Гидрометеоиздат, 1983.
5. Звонарев Б.А., Зырин Н.Г. Изучение форм соединений ртути в почвах с помощью пиролиза при разных температурах // Биологические науки. 1982. № 8. С. 97–102.
6. Ильин В.Б., Сысо А.И., Байдена Н.Л. и др. Фоновое количество тяжёлых металлов в почвах юга Западной Сибири // Почвоведение, 2003. №5. С. 550–556.
7. Касимов Н.С., Власов Д.В. Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии // Вестник московского университета, сер. 5 География, 2015. №2. С. 7–17.

8. Качинский Н.А. Механический и микроагрегатный состав почвы, методы его изучения. М.: Изд-во АН СССР, 1958. С. 25–191 с.
9. Клюев Н. Н. Экологические итоги реформирования России // Вестник Российской академии наук. 2001. Т. 71. № 3. С. 233–239.
10. Маликова И.Н., Страховенко В.Д. Корреляционные связи ртути в почвах и донных отложениях оз. Большое Яровое // Химия в интересах устойчивого развития, 2017. № 25. С. 195–203.
11. Никулина У.С., Кукин И.А., Гладков С.Ю. и др. Об определении форм ртути в сильнозагрязненных почво-грунтах антропогенного происхождения // Успехи в химии и химической технологии, 2013. Том XXVII. №6. С. 25–29.
12. ПНД Ф 16.1:2:2.2.80-2013 (М 03-09-2013) Количественный химический анализ почв. 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: https://docs.cntd.ru/document/437170371
13. Питиримов П.В. Ртуть в почвах на территории исторической части СПбГУ // Вестник СПбГУ. Сер. 7. 2014. Вып. 1. С. 57–61.
14. Попрядухин В.Н. Основные экологические проблемы Алтайского края и пути их решения // Роль Алтайского края в экологическом каркасе Российской Федерации: сборник тезисов научно-практической конференции. – Барнаул: Типография управления делами Правительства Алтайского края, 2017. С. 6–8.
15. Радченко А.И. Формы нахождения ртути в биосфере // Минералогический журнал. 1999. №5/6. С. 48–56.
16. Робертус Ю.В., Удачкин В.Н., Рихванов Л.П. и др. Индикация компонентами природной среды трансграничного переноса

загрязняющих веществ на территорию Горного Алтая // Известия Томского политехнического университета. 2016. Т. 327. № 9. С. 39–48.

17. СанПиН 1.2.3685-21. «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». Минюст РФ, 2021. С. 469. https://www.rospotrebnadzor.ru/files/news/GN_sreda%20_obitaniya_compressed.pdf
18. Gómez-Armesto Antía, Martínez-Cortizas Antonio, Ferro-Vázquez Cruz et al. Modelling Hg mobility in podzols: Role of soil components and environmental implications // Environmental Pollution, Volume 260, 2020, 114040. doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114040
19. Antía Gómez-Armesto, Melissa Méndez-López, Xabier Pontevedra-Pombal et al. Soil properties influencing Hg vertical pattern in temperate forest podzols // Environmental Research, Volume 193, 2021, 110552. doi.org/10.1016/j.envres.2020.110552
20. Bijun Cheng, Ziyue Wang, Xiaoqing Yan et al. Characteristics and pollution risks of Cu, Ni, Cd, Pb, Hg and As in farmland soil near coal mines /// Soil & Environmental Health, Volume 1, Issue 3, 2023, 100035. doi.org/10.1016/j.seh.2023.100035.
21. Chongchong Qi, Xinhang Xu, Qiusong Chen et al. Ab initio calculation of the adsorption of As, Cd, Cr, and Hg heavy metal atoms onto the illite(001) surface: Implications for soil pollution and reclamation // Environmental Pollution, Volume 312, 2022, 120072. doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120072.
22. Chunjie Wang, Zhangwei Wang, Yu Gao et al. Planular-vertical distribution and pollution characteristics of cropland soil Hg and the

estimated soil–air exchange fluxes of gaseous Hg over croplands in northern China // Environmental Research, Volume 195, 2021, 110810. doi.org/10.1016/j.envres.2021.110810.

23. Malikova I.N., Ustinov M.T., Anoshin G.N. et al. Mercury in soils and plants in the area of Lake Bol'shoe Yarovoe (Altai Territory) // Russian Geology and Geophysics.Volume 49, Issue 1, January 2008, p. 46-51.
24. Penggang Pei, Tao Sun, Yingming Xu et al. Soil aggregate–associated mercury (Hg) and organic carbon distribution and microbial community characteristics under typical farmland–use types //Chemosphere, Volume 275, 2021, 129987. doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129987.
25. Rashid A., Schutte B.J., Ulery A. et al. Heavy Metal Contamination in Agricultural Soil: Environmental Pollutants Affecting Crop Health. Agronomy 2023, 13, 1521. https://doi.org/10.3390/agronomy13061521
26. Rongguo Sun, Tao Zhao, Li Fan et al. The transformation of soil Hg oxidation states controls elemental Hg release in the greenhouse with applying organic fertilizer // Journal of Hazardous Materials, Volume 454, 2023, 131520. doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131520.
27. Liangmiao Zhang, Hualin Wang, Jordi Delgado et al. Bioavailability and health risk of toxic heavy metals (As, Hg, Pb and Cd) in urban soils: A Monte Carlo simulation approach // Environmental Research, Volume 214, Part 1, 2022, 113772. doi.org/10.1016/j.envres.2022.113772.

References

1. Anoshin G.N., Malikova I.N., Kovalev S.I. and others. Mercury in the environment of the south of Western Siberia // Chemistry for sustainable development, vol. 3, no. 1-2, 1995, p. 69-111.
2. Vazhov V.M. Buckwheat in the fields of Altai: monograph / M.: Publishing House of the Academy of Natural Sciences, 2013. – 188 p.
3. Vodyanitsky Yu.N., Lyadonin D.V., Savichev A.T. Soil contamination with heavy metals / M., 2012. P. 305.
4. GOST 17.4.02-84. "Soils. Methods of sampling and preparation of samples for chemical, bacteriological, helminthological analysis" M., Gidrometeoizdat, 1983.
5. Zvonarev B.A., Zyrin N.G. Study of the forms of mercury compounds in soils using pyrolysis at different temperatures // Biological Sciences. – 1982. – No. 8. – P. 97-102.
6. Ilyin V.B., Syso A.I., Bidena N.L. and others. Background amount of heavy metals in soils of the south of Western Siberia // Pochvovedenie, 2003, No. 5, p. 550-556.
7. Kasimov N.S., Vlasov D.V. Clarks of chemical elements as standards of comparison in ecogeochemistry // Bulletin of Moscow University, ser. 5 Geography, 2015, No. 2, p. 7–17. eleven.
8. Kachinsky N.A. Mechanical and microaggregate composition of soil, methods of studying it. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1958. - P. 25. - 191 p.
9. Klyuev N. N. Environmental results of reforming Russia // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2001. T. 71. No. 3. P. 233–239.
10. Malikova I.N., Strakhovenko V.D. Correlation connections of mercury in soils and bottom sediments of the lake. Bolshoye Yarovoye // Chemistry for sustainable development, No. 25, 2017, p. 195-203.

11. Nikulina U.S., Kukin I.A., Gladkov S.Yu. and others. On the determination of mercury forms in heavily contaminated soils of anthropogenic origin // Advances in chemistry and chemical technology. Volume XXVII. 2013. No. 6, p. 25-29.
12. PND F 16.1:2:2.2.80-2013 (M 03-09-2013) Quantitative chemical analysis of soils. Methodology for measuring the mass fraction of total mercury in soil samples, including greenhouse soils, clays and bottom sediments by the atomic absorption method using a RA-915M mercury analyzer.
13. Pitirimov P.V. Mercury in soils on the territory of the historical part of St. Petersburg State University // Bulletin of St. Petersburg State University. Ser. 7. 2014. Issue. 1, p. 57-61.
14. Popryadukhin V.N. The main environmental problems of the Altai Territory and ways to solve them // The role of the Altai Territory in the ecological framework of the Russian Federation: a collection of abstracts of a scientific-practical conference. – Barnaul: Printing House of Administration of the Government of the Altai Territory, 2017. – P. 6-8.
15. Radchenko A.I. Forms of mercury occurrence in the biosphere // Mineralogical Journal. 1999. – No. 5/6. – pp. 48-56.
16. Robertus Yu.V., Udachkin V.N., Rikhvanov L.P. and others. Indication by components of the natural environment of transboundary transfer of pollutants to the territory of the Altai Mountains // News of Tomsk Polytechnic University. – 2016. – T. 327. – No. 9. – P. 39–48.
17. SanPiN 1.2.3685-21. “Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors to humans.” Ministry of Justice of the Russian Federation, 2021. P. 469.

18. Antía Gómez-Armesto, Antonio Martínez-Cortizas, Cruz Ferro-Vázquez et al. Modelling Hg mobility in podzols: Role of soil components and environmental implications // Environmental Pollution, Volume 260, 2020, 114040. doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114040
19. Antía Gómez-Armesto, Melissa Méndez-López, Xabier Pontevedra-Pombal et al. Soil properties influencing Hg vertical pattern in temperate forest podzols // Environmental Research, Volume 193, 2021, 110552. doi.org/10.1016/j.envres.2020.110552
20. Bijun Cheng, Ziyue Wang, Xiaoqing Yan et al. Characteristics and pollution risks of Cu, Ni, Cd, Pb, Hg and As in farmland soil near coal mines /// Soil & Environmental Health, Volume 1, Issue 3, 2023, 100035. doi.org/10.1016/j.seh.2023.100035.
21. Chongchong Qi, Xinhang Xu, Qiusong Chen et al. Ab initio calculation of the adsorption of As, Cd, Cr, and Hg heavy metal atoms onto the illite(001) surface: Implications for soil pollution and reclamation // Environmental Pollution, Volume 312, 2022, 120072. doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120072.
22. Chunjie Wang, Zhangwei Wang, Yu Gao et al. Planular-vertical distribution and pollution characteristics of cropland soil Hg and the estimated soil–air exchange fluxes of gaseous Hg over croplands in northern China // Environmental Research, Volume 195, 2021, 110810. doi.org/10.1016/j.envres.2021.110810.
23. Malikova I.N., Ustinov M.T., Anoshin G.N. et al. Mercury in soils and plants in the area of Lake Bol’shoe Yarovoe (Altai Territory) // Russian Geology and Geophysics.Volume 49, Issue 1, January 2008, p. 46-51.

24. Penggang Pei, Tao Sun, Yingming Xu et al. Soil aggregate–associated mercury (Hg) and organic carbon distribution and microbial community characteristics under typical farmland–use types //Chemosphere, Volume 275, 2021, 129987. doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129987.
25. Rashid A., Schutte B.J., Ulery A. et al. Heavy Metal Contamination in Agricultural Soil: Environmental Pollutants Affecting Crop Health. Agronomy 2023, 13, 1521. https://doi.org/10.3390/agronomy13061521
26. Rongguo Sun, Tao Zhao, Li Fan et al. The transformation of soil Hg oxidation states controls elemental Hg release in the greenhouse with applying organic fertilizer // Journal of Hazardous Materials, Volume 454, 2023, 131520. doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131520.
27. Liangmiao Zhang, Hualin Wang, Jordi Delgado et al. Bioavailability and health risk of toxic heavy metals (As, Hg, Pb and Cd) in urban soils: A Monte Carlo simulation approach // Environmental Research, Volume 214, Part 1, 2022, 113772. doi.org/10.1016/j.envres.2022.113772.