

УДК 550.47:631.416

## Распределение ртути в компонентах окружающей среды горнорудных районов Республики Алтай

Д.В. Юсупов<sup>1</sup>, Ю.В. Робертус<sup>2</sup>, Л.П. Рихванов<sup>1</sup>, Р.В. Любимов<sup>2</sup>,  
Е.Е. Ляпина<sup>3</sup>, Е.М. Турсуналиева<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

<sup>2</sup>Институт водных и экологических проблем (ИВЭП) СО РАН  
656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1

<sup>3</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН  
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3

Поступила в редакцию 29.01.2017 г.

Проводится оценка содержания ртути в природных средах: в почвах, листьях и хвое древесной растительности, а также в атмосферном и почвенном воздухе, — в пределах участков техногенного ртутного загрязнения речных долин Республики Алтай, сформировавшихся в результате добыче ртути и золота горнодобывающими предприятиями. Исследованы участки в зонах влияния рудников «Весёлый», «Акташский», «Майский» и в долине р. Катунь на отрезке проектируемой ГЭС. Установлены высокие концентрации ртути и их корреляционные зависимости в сопряженных компонентах окружающей среды. Оценены доли обменной и связанной форм ртути в загрязненной почве, а также вклад атмосферного и почвенного путей ее поступления в растения.

*Ключевые слова:* ртуть, золото, амальгама, атмосфера, почва, древесная растительность, Алтай; mercury, gold, amalgam, atmosphere, soil, woody vegetation, Altai.

### Введение

Ртуть, обладая уникальными физическими, геохимическими свойствами и высокой токсичностью, занимает особое место среди загрязняющих окружающую среду веществ. Существуют две группы источников ее поступления в окружающую среду: природная и антропогенная. Первая связана с условиями геологической среды, а вторая — с применением ртути в промышленном производстве [1]. Обе группы вносят значительный вклад в эмиссию ртути в атмосферу [2, 3].

На территории Республики Алтай представлены обе группы источников. К первой из них относится ряд месторождений, проявлений, литохимических ореолов и потоков рассеяния ртути в центральной и юго-восточной части региона, в пределах Салаир-Алтайской ртутно-серебряно-полиметаллической минерагенической области [4, 5]. Ртуть как элемент-спутник в повышенных концентрациях присутствует также в ряде месторождений благородных металлов, расположенных на северо-востоке региона в пределах Алтае-Кузнецко-Северосаянской ртутно-железо-золотородной минерагенической области [6].

Вторая группа источников ртути связана с ее добычей и использованием в хозяйственной деятельности. На территории Республики Алтай основными техногенными факторами ее эмиссии в окружающую среду стали отработка в XX в. Акташского ртутного месторождения [7] и переработка ртутьсодержащих отходов на Акташском горно-металлургическом предприятии (АГМП) [8], а также амальгамация тонкого золота при отработке коренного золота на Сихотинском золото-медно-скарновом [9], Майском золото-магнетит-скарновом месторождениях и многочисленных россыпей в Северо-Восточном Алтае.

Негативные последствия добычи и применения ртути для окружающей среды в перечисленных горнорудных районах в прошлом веке являются актуальной экологической и социально-экономической проблемой Республики Алтай.

Цель данной работы — оценка содержания ртути в сопряженных природных средах — в почвах, листьях и хвое древесной растительности, в приземном и почвенном воздухе в различных ландшафтно-геохимических условиях региона.

### Объекты и методы исследования

В 2016 г. по единичным ландшафтно-геохимическим профилям проведен отбор проб компонентов окружающей среды в пределах следующих участков речных долин на территории Республики Алтай: 1) рек Чибитка и Ярлыамры от промзоны бывшего

\* Дмитрий Валерьевич Юсупов (yusupovd@mail.ru); Юрий Владимирович Робертус (ariecol@mail.gorny.ru); Леонид Петрович Рихванов (richvanov@tpu.ru); Роман Владимирович Любимов (r.lybimov@mail.ru); Елена Евгеньевна Ляпина (eeldv@mail.ru); Елена Муратовна Турсуналиева (tobi.1993@mail.ru).

АГМП до с. Акташ (10 км) и с. Чибит (17 км), 2) рек Синюха и Сейка — промзона рудника «Весёлый» и с. Сейка (7 км), 3) р. Каурчак, с. Майское (4 км), 4) р. Катунь между селами Эдиган и Еланда (37 км), где проектировалось ложе водохранилища Катунской ГЭС (рис. 1).

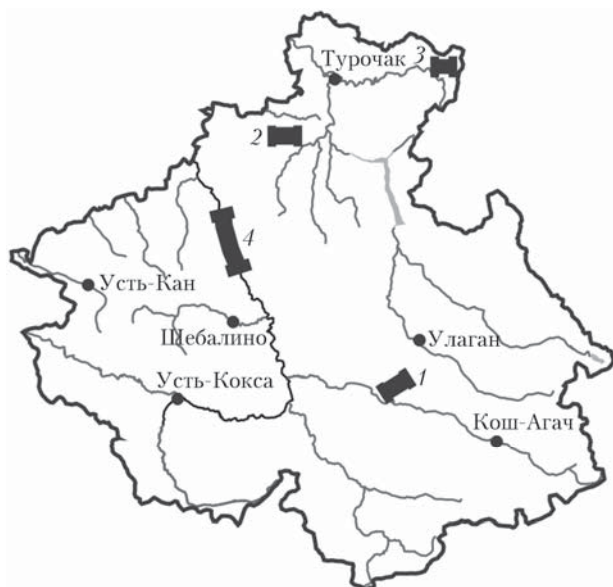


Рис. 1. Схема исследованных участков речных долин Республики Алтай: 1 — долина р. Ярлыамры, промышленная зона АГМП; 2 — долина р. Сейка, рудник «Весёлый»; 3 — долина р. Каурчак, бывший рудник «Майский»; 4 — долина р. Катунь с ложем проектного водохранилища Катунской ГЭС

Промышленная зона АГМП находится в Улаганском районе Республики Алтай, на юго-западном склоне Курайского хребта в верховье р. Ярлыамры. В 8-ми км западнее промышленной зоны у слияния рек Чибитка и Менка расположено с. Акташ с населением более 3500 чел. С 1942 по 1990 г. Акташское рудоуправление (предшественник АГМП) обрабатывало одноименное месторождение ртути, из которого было добыто 3700 т металла. В конце 1980-х гг. в связи с погашением запасов ртути предприятие перешло на переработку ртутьсодержащих отходов, которые поступали от предприятий Сибири и Урала. Всего за 1990—2007 гг. АГМП переработало более 5000 т ртутьсодержащих отходов, при этом получено 100 т товарной ртути [7, 10]. В настоящее время предприятие не работает. Основным источником негативного воздействия на окружающую среду являются его производственные отходы — металлургические шлаки (1,8 млн. т) и штольневые отвалы вмещающих пород (около 5 млн. т), содержащие повышенные концентрации ртути и других тяжелых металлов [8].

Рудник «Весёлый», обрабатывающий с 1954 г. Синюхинское золото-медно-скарновое месторождение, находится в Чойском районе Республики Алтай, в 70-ти км юго-восточнее Горно-Алтайска. Промышленная зона рудника включает в себя ряд объектов: шахту, штольни, карьеры, золотоизвлекательную

фабрику (ЗИФ), хвостохранилище и др. Концентрат, полученный в результате обогащения руд на ЗИФ, до 2009 г. подвергался амальгамации; отходы обогащения размещались в хвостохранилище; стоки сбрасывались в р. Синюха — правый приток р. Сейка. В данный момент на ЗИФ применяются «безртутная» технология обогащения руд и используется система оборотного водоснабжения.

Село Майское находится в Турочакском районе Республики Алтай в месте слияния рек Каурчак и Андоба. Майское золото-магнетит-скарновое месторождение, открытое в 1960-х гг., обрабатывалось карьерным способом одноименным рудником до середины 1980-х гг. Золото из руд извлекалось на обогатительной фабрике с применением технологии амальгамации. Ртуть применялась вплоть до 2014 г. для извлечения металла при дражном и гидравлическом способах добычи россыпного золота. Примечательно, что цех амальгамации находился в центре с. Майское.

Бассейн р. Катунь дренирует металлогенические области и районы, где имеются месторождения и проявления ртути, мышьяка, сурьмы, кадмия и других металлов, их вторичные геохимические ореолы и потоки рассеяния [11]. В 1987—1988 гг. стоял вопрос о строительстве на р. Катунь одноименной ГЭС, но по экономическим и экологическим причинам (вероятность повышения фонового содержания ртути и ее трансформация в монометилртуть в условиях водохранилища) реализация проекта была остановлена [12].

Пробы почвы для исследования были взяты из горизонта «А» (интервал 0—10 см) в долинах рек перечисленных выше участков. В сопряженных с почвой точках отбирали листья тополя лавролистного (*Populus laurifolia* L.), березы повислой (*Betula pendula* R.), хвою пихты сибирской (*Abies sibirica* L.) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) согласно методическим рекомендациям [13]. Всего отобрано 89 почвенных проб и древесных образцов.

Определение содержания ртути в пробах выполнено на ртутном анализаторе «РА-915М» с приставкой «ПИРО-915+» методом атомной абсорбции (метод пиролиза) в лаборатории микроэлементного анализа Международного инновационного научно-образовательного центра «Урановая геология» Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета. Предел обнаружения метода — 5 нг/г. Часть образцов почвы проанализирована методом атомно-абсорбционной спектроскопии в Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН. Для контроля точности измерения ртути использовали стандартные образцы состава дерново-подзолистой супесчаной почвы СДПС-3 (ГСО 2500-83) и листа березы ЛБ-1 (ГСО 8923-2007).

Содержание ртути в атмосферном и почвенном воздухе определялось с помощью газортутного анализатора АГП-01М. В каждой точке на профиле производили замеры атмосферного воздуха на высоте 30 см над поверхностью земли и почвенного воздуха на глубине 30 см из бурок диаметром 5 см.

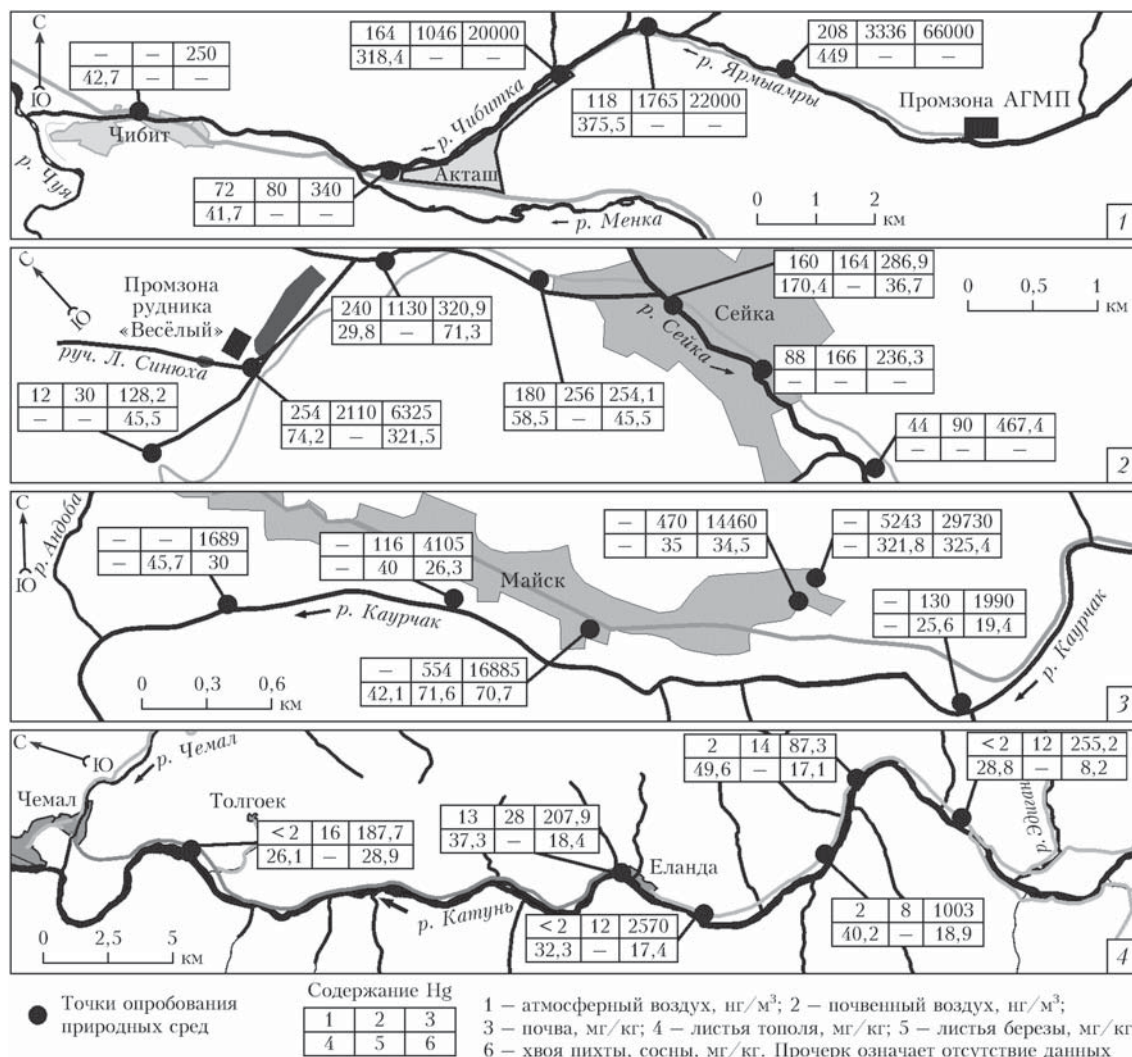


Рис. 2. Картограммы отбора проб и концентрации Hg в природных средах участков речных долин Республики Алтай: 1 – долина рек Ярлыамры и Чибитка, промышленная зона АГМП; 2 – долина р. Сейка, промышленная зона рудника «Весёлый»; 3 – долина р. Каурчак, с. Майское; 4 – долина р. Катунь с ложем проектного водохранилища Катунской ГЭС

Результаты приведены на рис. 2. Содержание ртути в образцах почвы и растительного материала указано на 1 г сухого вещества.

## Результаты и их обсуждение

Полученные данные о распределении ртути в природных средах изученных участков речных долин Республики Алтай однозначно указывают на высокую вариабельность ее концентраций в приземном и атмосферном воздухе, многократно превышающих региональное и местное фоновые значения, а для почв и растений – эколого-гигиенические нормативы. Среднее содержание ртути превышает местный фон в приземном воздухе в 2–3 раза, в растениях и почве в 1,5–3,8 раза, в почвенном воздухе в 2,5–8,0 раз. Уровень загрязнения ртутью компонентов окружающей среды изученных территорий увеличивается в следующем порядке: долина р. Катунь – район рудника «Весёлый» – с. Акташ – с. Майское – промышленная зона АГМП, т.е. нарастает от территорий

повышенного природного фона ртути к участкам ее промышленного использования и добычи (табл. 1).

Анализ корреляционных связей содержания ртути в сопряженных природных средах исследованных территорий показал, что большая часть этих связей имеет значимый и высоко значимый уровень. В частности, это касается концентраций ртути в почвенном воздухе, почве и приземном атмосферном воздухе, что вполне объяснимо с позиций единого для них источника поступления ртути (табл. 2).

Корреляционные связи между содержанием ртути в образцах лиственных и хвойных древесных пород, являющихся реципиентами ее поступления из почвы, и в почвенном и приземном воздухе более индивидуальны на разных участках долин рек. Так, значимо связаны концентрации ртути в листьях тополя и в почве, почвенном и приземном воздухе в районе промышленной зоны АГМП. Более тесные корреляционные связи между содержанием ртути в вегетативных органах хвойных и лиственных пород деревьев с почвой и почвенным воздухом

Содержание Hg в природных средах участков речных долин Республики Алтай

Объект исследования	Приземный воздух, нг/м <sup>3</sup>		Почвенный воздух, нг/м <sup>3</sup>		Почва, мг/кг		Растения**, мг/кг (сухое вещество)	
	среднее (макс)	фон*	среднее (макс)	фон*	среднее (макс)	фон*	среднее (макс)	фон*
Долина р. Ярлыамры, промзона АГМП	100 (458)	50	250 (3010)	100	13 (> 1000)	0,20	0,38 (0,45)	0,10
Долина р. Чибитка, с. Акташ	70 (128)	30	230 (5188)	70	1 (1,9)	0,10	0,06 (0,15)	0,03
Долина р. Сейка, рудник «Весёлый», с. Сейка	30 (264)	10	165 (4936)	20	0,3 (6,3)	0,15	0,10 (0,32)	0,03
Долина р. Каурчак, с. Майское	нет данных		200 (32430)	30	2,6 (29,7)	0,20	0,08 (0,32)	0,03
Долина р. Катунь***	5 (37)	< 2	20 (98)	4	0,2 (2,6)	0,05	0,03 (0,05)	0,02
Фон Горного Алтая	< 1 [8]		< 1 [8]		0,04–0,12 [8]		0,01 [9]	
Кларк (мировой фон)	1,7 [14]		1,7 [14]		0,06 [14]		0,017 [14]	

\* – местный фон, \*\* – листья и хвоя деревьев, \*\*\* – ложе проектного водохранилища Катунской ГЭС.

Коэффициенты корреляции между содержанием Hg в природных средах объектов исследования

Объект исследования	Почвенный воздух	Почва	Лиственные виды		Хвойные виды		Природная среда
			тополь	береза	пихта	сосна	
Долина р. Ярлыамры, промзона АГМП	0,85	0,90	0,85	–	–	–	Приземный воздух
	1	<b>0,98</b>	0,93	–	–	–	Почвенный воздух
	–	1	0,87	–	–	–	Почва
Долина р. Каурчак, с. Майское	1	0,81	–	<b>0,99</b>	<b>0,99</b>	–	Почвенный воздух
	–	1	–	0,85	0,85	–	Почва
	–	–	–	1	<b>0,99</b>	–	Листья березы
Долина р. Сейка, рудник «Весёлый», с. Сейка	0,79	0,54	0,19	–	0,54	–	Приземный воздух
	1	0,88	0,13	–	0,91	–	Почвенный воздух
	–	1	0,04	–	<b>0,99</b>	–	Почва
	–	–	1	–	0,03	–	Листья тополя
Долина р. Катунь	1	0,38	0,42	–	–	0,18	Почвенный воздух
	–	1	0,03	–	–	0,06	Почва
	–	–	1	–	–	0,15	Листья тополя

Примечание. Серым цветом выделены значимые коэффициенты парной корреляции на уровне значимости  $p = 0,05$ , полужирным – при  $p = 0,01$ , прочерк означает отсутствие данных.

наблюдаются в пределах участков речных долин возле промышленно-селитебных зон золотодобывающих предприятий – рудника «Весёлый» и бывшего рудника «Майский». В целом наиболее сильная корреляция с источниками ртути *in situ* – у листьев березы и хвои пихты сибирской (табл. 2).

Максимальные концентрации ртути в сопряженных природных средах обнаружены в долинах рек вблизи мест размещения ртутьсодержащих отходов АГМП и хвостов обогащения ЗИФ рудника «Весёлый». Наибольшая вариабельность содержания ртути характерна для почвенного воздуха. В наименьшей степени изменяются концентрации ртути в приземной атмосфере и растительности – ее конечных реципиентах (рис. 3).

Известно [15], что многие растения служат биогеохимическими индикаторами уровня содержания

биологически доступных форм тяжелых металлов в окружающей среде. Они могут поглощать ртуть как из почвы, так и из атмосферного воздуха [16, 17]. При изучении вклада корневого и атмосферного поступления ртути в листья тополя был сделан вывод [18], что последние поглощают испарившуюся из почвы ртуть исключительно из приземного воздуха.

Установлен схожий механизм поглощения атмосферных выпадений ртути через устьица листьями культивируемых и дикорастущих растений [19]. Из почв растения усваивают в основном подвижные (обменные) формы тяжелых металлов [20, 21]. Доля обменной формы ртути в почве, как правило, незначительна. Так, для загрязненных почв промышленной зоны АГМП она составляет всего 0,04–0,25% (в среднем 0,1%) и увеличивается при уменьшении содержания связанной ртути (рис. 4).

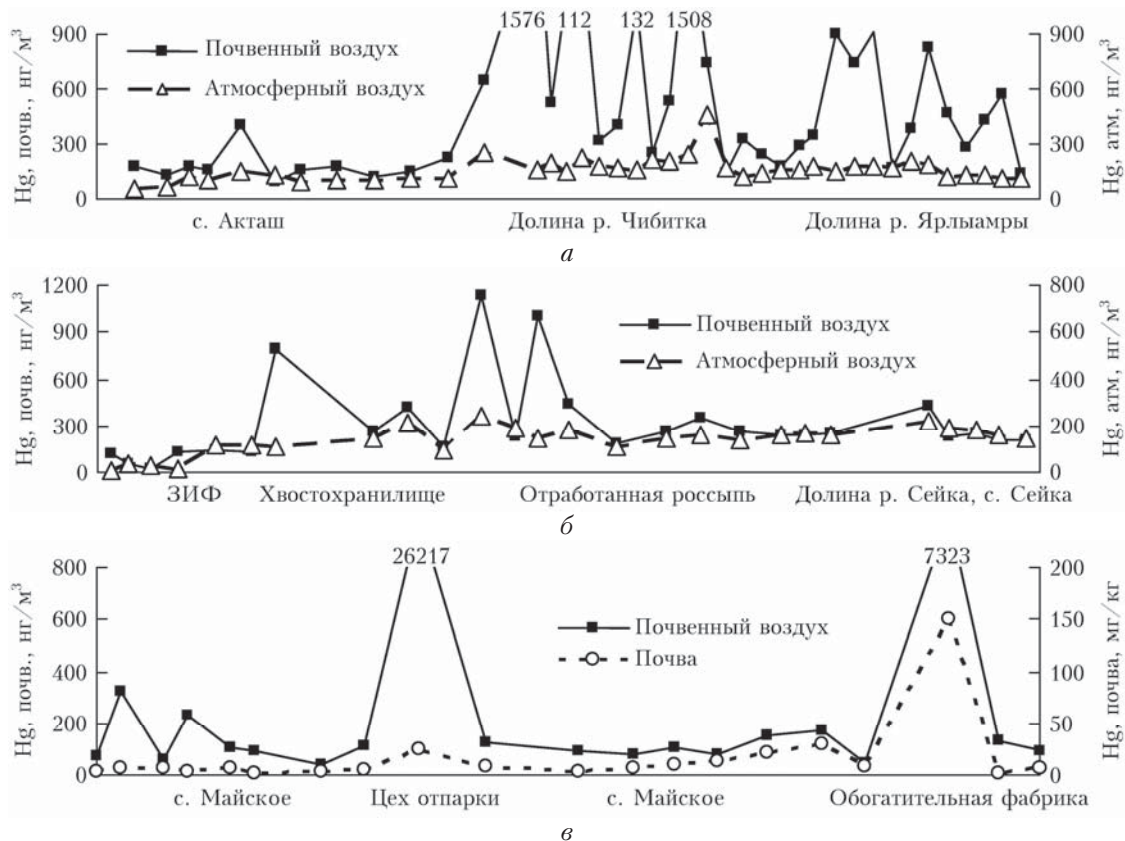


Рис. 3. Распределение содержания Hg в почве, почвенном и приземном атмосферном воздухе на изученных объектах: а – район промышленной зоны АГМП; б – район рудника «Весёлый»; в – район бывшего рудника «Майский»

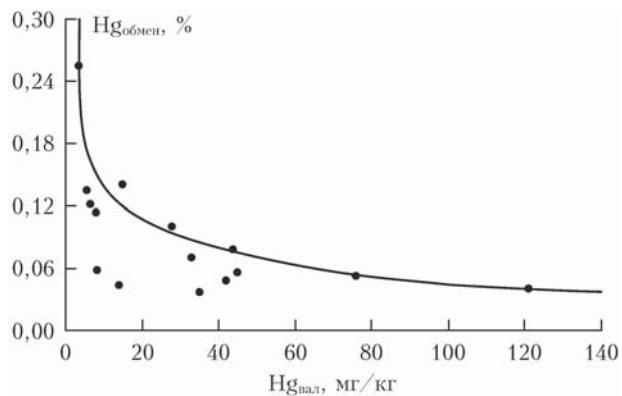


Рис. 4. Отношение доли обменной формы Hg к общему содержанию Hg в почве промышленной зоны АГМП

При низких величинах отношения обменной и связанной форм в условиях высоких концентраций Hg в почве, особенно вблизи месторождений, доля усваиваемых соединений ртути существенно увеличивается за счет ее поглощения листьями растений из приземного атмосферного воздуха.

### Заключение

В работе дана оценка содержания ртути в сопряженных природных средах на участках речных долин Горного Алтая, где наблюдается ее техноген-

ная эмиссия вследствие отработки месторождения ртути и применения последней при золотодобыче в прошлом. Установлено, что в местах добычи и использования ртути ее местный геохимический фон превышен в 2–3 раза в растениях, почве и до 8 раз в почвенном воздухе. Минимально повышен уровень содержания ртути в долине р. Катунь на участке проектного ложа водохранилища Катунской ГЭС. Максимальный уровень загрязнения ртутью компонентов окружающей среды на территории Республики Алтай отмечен в долине р. Ярлыамры в промышленной зоне АГМП, где велась ее добыча и переработка ртутьсодержащих отходов. Умеренно и аномально повышенные концентрации выявлены в зонах влияния горнодобывающих предприятий – рудника «Весёлый» и бывшего рудника «Майский», ранее активно применявших технологию амальгамации золота. Оценено изменение содержания ртути в зависимости от расстояния до источников загрязнения. На примере промзоны АГМП показано, что доля обменной формы ртути в загрязненных почвах, как правило, незначительна. Тем не менее в условиях высоких концентраций ртути в почве доля ее соединений, усваиваемых растениями, существенно увеличивается.

Авторы глубоко признательны Н.В. Андросовой, ведущему сотруднику лаборатории изотопно-геохимических методов анализа Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, за помощь в выполнении аналитических работ.

1. Степанов В.А., Юсупов Д.В., Радомская В.И. Экологические последствия складирования ртутьсодержащих отходов золотодобычи в пос. Соловьевск (Амурская область) // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2003. Т. 22, № 5. С. 540–545.
2. Потемкин В.Л., Макухин В.Л., Гусева Е.А. Исследование процессов переноса и осаждения ртутьсодержащих веществ в атмосфере Южного Прибайкалья // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 10. С. 906–909.
3. Фролова Н.С., Эйрих С.С., Зинченко Г.С. Анализ атмосферных процессов, влияющих на поступление ртути на территорию Алтая (на примере ледника г. Белухи) // Материалы Междунар. конф. «Биоразнообразие, проблемы экологии Горного Алтая и сопредельных регионов: настоящее, прошлое, будущее». Горно-Алтайск, 22–26 сентября 2008 г. Горно-Алтайск: Изд-во Горно-Алтайского гос. ун-та, 2008. С. 129–31.
4. Гусев А.И. Типизация ртутного оруденения Алтайского края // Усп. совр. естеств. 2013. № 6. С. 110–114.
5. Гусев А.И. Серебряное оруденение Горного Алтая // Усп. совр. естеств. 2012. № 9. С. 23–26.
6. Гусев А.И. Типизация золото-ртутного оруденения Горного Алтая // Усп. совр. естеств. 2012. № 12. С. 87–92.
7. Робертус Ю.В., Пузанов А.В., Любимов Р.В., Архипов И.А. Экогеохимия ртути в природных средах и техногенных объектах района Акташского ГМП (Республика Алтай) // Мир науки, культуры, образования. 2010. № 2. С. 280–282.
8. Робертус Ю.В., Пузанов А.В., Любимов Р.В. Особенности ртутного загрязнения окружающей среды в районе Акташского горно-металлургического предприятия (Республика Алтай) // География и природные ресурсы. 2015. № 3. С. 48–55.
9. Гусев А.И., Гусева О.И. Биогеохимические индикаторы накопления тяжелых металлов растениями на горно-рудных предприятиях Горного и Рудного Алтая // Вестн. ВГУ. Геология. 2012. № 1. С. 194–199.
10. Архипов И.А., Пузанов А.В. Акташское ртутное месторождение (Юго-Восточный Алтай) как потенциальный источник поступления ртути в объекты окружающей природной среды // Мир науки, культуры, образования. 2007. № 4(7). С. 23–26.
11. Папина Т.С., Артемьева С.С., Темерев С.В. Особенности миграции ртути в бассейне р. Катунь // Водные ресурсы. 1995. Т. 22, № 1. С. 60–66.
12. Аношин Г.Н. Ртутная проблема и экологическая экспертиза проекта Катунской ГЭС // Материалы Междунар. симпозиума «Ртуть в биосфере: эколого-геохимические аспекты». Москва, 7–9 сентября 2010 г. М.: ГЕОХИ РАН, 2010. С. 90–95.
13. Методические рекомендации по проведению полевых и лабораторных исследований почв и растений при контроле загрязнения окружающей среды металлами / под ред. Н.Г. Зырина, С.Г. Малахова. М.: Гидрометеоздат, 1981. 108 с.
14. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов: справочник. В 6 кн. Кн. 3. Редкие р-элементы / под ред. Э.К. Буренкова. М.: Недра, 1996. 352 с.
15. Юсупов Д.В. Биогеохимические ореолы золота и ртути Покровского золоторудного месторождения (Верхнее Приамурье) // Изв. вузов. Геология и разведка. 2009. № 6. С. 38–43.
16. Рихванов Л.П., Юсупов Д.В., Барановская Н.В., Ялалдинова А.Р. Элементный состав листьев тополя как биогеохимический индикатор промышленной специализации урбасистем // Экология и промышленность России. 2015. № 6. С. 58–63.
17. Юсупов Д.В., Рихванов Л.П., Барановская Н.В., Ялалдинова А.Р. Геохимические особенности элементного состава листьев тополя урбанизированных территорий // Изв. Томского политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327, № 6. С. 25–36.
18. Assad M., Parelle J., Cazaux D., Gimbert F., Chalot M., Tatin-Froux F. Mercury uptake into poplar leaves // Chemosphere. 2016. V. 146. P. 1–7.
19. Egler S.G., Rodrigues-Filho S., Villas-Boas R.C., Beinhoff C. Evaluation of mercury pollution in cultivated and wild plants from two small communities of the Tapajós gold mining reserve, Pará State, Brazil // Sci. Total Environ. 2016. V. 368. P. 424–433.
20. Malikova I.N., Anoshin G.N., Badmaeva Zh.O. Mobile mercury species in soils of natural and natural-technogenic landscapes // Rus. Geol. Geophys. 2011. V. 52. P. 320–332.
21. Santos-Francés F., García-Sánchez A., Alonso-Rojo P., Contreras F., Adams M. Distribution and mobility of mercury in soils of a gold mining region, Cuyuni river basin, Venezuela // J. Environ. Manag. 2011. V. 92. P. 1268–1276.

*D.V. Yusupov, Yu.V. Robertus, L.P. Rikhvanov, R.V. Lyubimov, E.E. Lyapina, E.M. Tursunalieva.*  
**Mercury distribution in the environment of mining areas in the Altai Republic (Russia).**

Mercury content is assessed in the natural environment—in soil, leaves and needles of woody vegetation, and atmospheric and soil air—within the areas of anthropogenic Hg contamination due to mercury and gold mining in river valleys of the Altai Republic, in zones of influence of “Veselyj”, “Aktash”, and “Mayskiy” mines, as well as in the Katun river valley in the segment of hydroelectric power station projected. High Hg concentrations and correlations between them in interfaced components of the environment are revealed. The shares of exchange and related Hg forms in contaminated soil are estimated, as well as the contributions of atmosphere and soil in the Hg assimilation by plants.