

УДК 330.15:622

**С.К. Мустафин¹, А.Н. Трифонов²,
Г.С. Анисимова³, К.К. Стручков⁴**

¹Башкирский государственный университет, г.Уфа

²Ленинградский государственный университет
им. А.С. Пушкина, г.Пушкин

³Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск

⁴Северо-Восточный федеральный университет
им. М.К. Аммосова, г.Якутск

РТУТНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В КОНТЕКСТЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ, ОЦЕНКИ И МОНИТОРИНГА ГЕОЛОГО-ЭКОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ

Ртуть как токсичный загрязнитель компонентов окружающей среды нуждается в количественной оценке масштабов эмиссии и миграции в процессе техногенной трансформации горнорудных районов. Особенности концентрации ртути в природном минеральном сырье, товарных продуктах и отходах переработки характеризуются на примере ртутьсодержащих медноколчеданных месторождений Урала. Ртуть использована как надёжный элемент-трассер эволюции техногенной системы: минеральное сырье - отходы недропользования – компоненты окружающей среды - продукты питания - организм человека. Комплексный подход рекомендуется для оптимизации прогнозирования, оценки и управления геолого-экологическими рисками, как инструментов геолого-экологического мониторинга современной системы горного инжиниринга.

Ключевые слова: Ртуть, токсичность, руда, концентрат, отходы, загрязнение окружающей среды.

DOI: 10.17072/chirvinsky.2022.171

Минаматская конвенция по ртути ООН (Minamata Convention on Mercury), вступившая в силу 16 августа 2017 г; подписанная 123 странами, ратифицированная 72, включая Российскую Федерацию (РФ), призвана защищать здоровье людей и окружающую среду от вредного воздействия ртути (Hg) и предусматривает сокращение производства содержащей Hg продукции, введение ограничений в горнодобывающую отрасль и производство цемента.

Месторождения Hg известны более чем в 40 странах мира, суммарные мировые ресурсы ртути оцениваются в 715 тыс. т, количественно учтенные запасы – в 324 тыс. т; по данным Геологической службы США в 2020 г. в мире было произведено 3700 тонн Hg, что на 200 тонн

меньше чем в 2019 г. (3900 т.). Странами-производителями Hg (в тоннах) были: Китай -3400, Таджикистан -100, Мексика – 60, Аргентина – 50, Перу – 40, Норвегия – 20, Кыргызстан – 15; остальные страны вместе получили 20 т. металла [5].

Согласно оценкам ЮНЕП, суммарные глобальные выбросы Hg в атмосферу (антропогенного и естественного происхождения) составляют 5000–8000 тонн в год. Реализация Проекта ЮНЕП-ГЭФ «Пилотная инвентаризация поступления Hg в окружающую среду в России» позволили оценить общий объём техногенной миграции супертоксиканта в окружающую среду (ОС) РФ в размере 1210 т/год; приоритетным источником эмиссии ртути в ОС является цветная металлургия; структура техногенной эмиссии Hg в ОС следующая (объём в тоннах / доля от общего поступления в процентах): в атмосферу – 36,599/31; в гидросферу – 14,879/68; в педосферу – 562,570/98; аккумулируется в отходах – 416,890/85 [4].

Государственным балансом запасов полезных ископаемых РФ учтено 26 месторождений Hg, в основном собственно ртутных преимущественно киноварного типа и три ртутьсодержащих медноколчеданных месторождения: Подольское в Республике Башкортостан (РБ), Талганское в Челябинской и Сафьяновское в Свердловской областях.

Добыча ртутных руд в РФ прекращена в 1992 г., а производство первичной Hg – в 1995 г. Вся Hg, производимая в стране, является продуктом ресайклинга (вторичной ртутью).

В РФ снижение использования Hg соответствует общемировой тенденции; потребление Hg на душу населения страны в 2001 г. составляло 1,1 г/год.

В рудах медноколчеданных месторождений Урала содержания Hg варьируют в широком диапазоне (г/т): Учалинского – 20–560, Сибайского месторождения (РБ) – 10–900, Гайского (Оренбургская область) – 1–90 г/т, Узельгинского (Челябинская обл.) – 0,0п–800 г/т.

В товарных продуктах обогатительных фабрик (ОФ) горно-обогатительных комбинатов (ГОК) Южного Урала - цинковых концентратах флотации средние содержания Hg составляют (г/т): для Учалинской – 53; Сибайской – 93; Гайской – 65. Основными минералом-концентратом ртути в рудах является сфалерит, содержащий от 70-250 г/т до 0,5-1,5% примеси токсиканта; блёклая руда теннантит $Cu_{12}As_4S_{13}$ содержит до 3% примеси.

Содержание ртути в концентратах Учалинского ГОКа различны (г/т) и последовательно растут в ряду: пиритный – 5-15; медный – 28-41; цинковый – 76-123 [3].

В процессе обогащения медноколчеданных руд при их измельчении образуется высокодисперсная рудничная пыль, содержащая SiO_2 – 3–4%, Cu – 26 мкг/м³; Zn – 74 мкг/м³; Cd – 0,13 мкг/м³; Pb – 1,6 мкг/м³. У флотомашин ОФ Учалинского ГОКа содержания тяжёлых металлов в воздухе рабочей зоны превышают уровни ПДК в 2-3 раза. В составе исследованных проб волос работниц здесь в качестве токсикантов установлены (мг/кг): Hg – 0,6±0,06 (референтные значения 0,05-2,0) и Cd – 0,09±0,01 (референтные значения 0,05-0,25).

Таблица

Региональная структура балансовых запасов ртути в РФ [4]

Месторождение	Геолого-промышленный тип	Доля в запасах, %	Содержание Hg в руде, %
Собственно ртутные месторождения			
Краснодарский край			
Белокаменное	Кварц-дикитовый	2,3	0,47
Салинское	То же	2,4	0,42
Дальнее	То же	1,8	0,31
Каскадное	То же	0,1	0,14
Республика Сев. Осетия			
Тибское	Кварц-дикитовый	1,6	0,25
Алтайский край			
Сухонькое	Карбонатный	0,6	0,24
Республика Алтай			
Чаган-Узунское	Лиственитовый	7,0	0,42
Черемшанское	Карбонатный	0,1	0,50
Кемеровская область			
Куприяновское	Кварц-дикитовый	0,2	0,32
Республика Тыва			
Терлигхайское	Полиаргиллитовый	5,1	0,22
Камчатская область			
Ляпганайское	Опалитовый	3,5	0,63
Олоторское	То же	1,7	1,05
Чемпуринское	То же	0,7	1,07
Респ. Саха (Якутия)			
Звездочка	Кварц-дикитовый	6,2	1,59
Гал-Хая	То же	1,1	0,60
Северное	То же	0,4	1,09
Среднее	То же	0,3	3,40
Балгикакчан	То же	0,1	1,63
Хабаровский край			
Ланское	Полиаргиллитовый	1,2	0,52
Чукотский АО			
Тамватнейское	Лиственитовый	33,1	0,70
Западно-Паляинское	Кварц-дикитовый	24,0	0,53
Ртутьсодержащие месторождения			
Республика Башкортостан			
Подольское	Медно-колчеданный	4,6	0,0025
Челябинская область			
Талганское	То же	0,6	0,0059
Свердловская область			
Сафьяновское	То же	0,2	0,0014

На крупнейший в РФ, Челябинский электро-цинковый завод ежегодно поступает порядка 20 т Hg, эмиссия и потери которой (переход в кислоту, шлам, пыль) в процессе получения Zn из концентратов имеют следующую структуру (т): выбросы в атмосферу – 1, 229; шлам – 5,4; серная кислота – 5,0; в канализацию – 0,3; свинцовый кек – 3,0; медный кек – 0,4.

Мощными техногенными источниками загрязнения ОС являются ртутьсодержащие отходы добычи и обогащения медноколчеданных руд: 1) некондиционные руды, вскрышные породы, подотвальные, карьерные и шахтные воды, 2) лежалые и текущие хвосты флотации, неиспользуемый пиритный концентрат, фильтраты хвостохранилищ.

Содержания основных загрязнителей ОС в составе вскрышных пород и некондиционных руд медно-колчеданных месторождений, в целом характеризуют данные отношения концентрации металлов в крупнообъемных отходах добычи, аккумулированных на Северном отвале Сибайского карьера, к соответствующей величине уральского кларка (знаменатель) (%): Cu – 0,01/0,005; Zn – 0,4/0,06; Cd – 0,003/0,00002; Hg – 0,00072/0,000003.

Материал лежалых хвостов флотации ОФ ГОКов Южного Урала сегодня рассматривается как перспективный для ресайклинга вид многокомпонентного техногенного минерального сырья, однако пока что он служат лишь мощным техногенным источником генерирующим загрязнение ОС старых горнорудных районов.

Так в составе 27,67 млн т хвостов Сибайской ОФ содержатся: Cu – 0,20% (запасы 56072,5 т); Zn – 0,5% (135348,8 т); Cd – 0,02% (2435,5т), а в 40,8 млн т хвостов Учалинской ОФ содержатся: Cu – 0,30% (запасы 120396 т); Zn – 0,61% (247389 т); Cd – 0,003% (1163,73т). Минеральный состав представлен (%): пиритом – 57, сфалеритом – 1,1%, халькопиритом – 0,8%, оксидами железа – 2, вторичными сульфидами – 0,2%, нерудными минералами – 38,9%.

Важным источником эмиссии Hg в ОС для Южного Урала является зона окисления сульфидных месторождений, так называемые «железные шляпы» представленные мощными залежами бурых железняков. Ярким примером этому служит железная шляпа Учалинского месторождения из 1012 тыс. т бурых железняков которой было извлечено 12113 кг Au, 177469 кг Ag и 1598 кг природной металлической Hg. Природная амальгама золота по составу близкая к фазе $Au_{0,81}Hg_{0,19}$ ($\rho=17,854$ г/см³) размерами 0,01-0,1 мм в ассоциации с самородным золотом развита в бурых железняках месторождения Бакр-Узьяк. Для почвы зоны техногенного влияния Учалинского ГОКа установлены следующие

соотношения концентраций тяжёлых металлов (отношение содержаний элемента в почвах/в почвообразующих породах) (мг/кг): Cu – 509/325; Zn – 191,5/48,0; Cd – 0,2/0,6; Hg – 0,02/0,06.

Эфельные отвалы многочисленных золотоносных россыпей, добыча мелкого и тонкого металла (менее 0,1 мм) из которых, нередко составлявшего основную долю запасов золота на месторождениях Южного Урала, ранее традиционно осуществлялась с помощью технологии амальгамации. В золотинах из техногенных россыпей Авзянского рудно-россыпного района выявлены фазы по структуре близкие к Au_6Hg_5 ($\rho=16,872 \text{ г/см}^3$) и Au_8Hg_8 ($\rho=17,721 \text{ г/см}^3$).

Ртутьсодержащими являются лежалые хвосты золотодобычи Мало-Каранской и Сиратурской амальгамационных фабрик, Тубинской амальгамационной фабрики и др.

В хвостах Тубинской золотоизвлекательной фабрики (ЗИФ) аккумулярованных в объёме 40000 т содержатся 222,2 т Cu в концентрации 555,6 мг/кг; Zn – 249,3т (623,3 мг/кг), Cd – 0,523 т (1,33 мг/кг); Hg – 6,1 т (15,23 мг/кг).

Токсичность 2638800 т лежалых хвостов перколяции – отходов чанового выщелачивания золота цианированием Семёновской ЗИФ (СЗИФ), включённой в список горячих экологических точек РФ определяют: As – 786,72мг/кг (2076,0т); Hg – 22,28 (58,8т); Cd – 2,88мг/кг (7,622т); Cu – 584,2 мг/кг (1541,6т); Zn – 528,01мг/кг (1393,3т) [2].

Подземные воды также испытывают мощную техногенную нагрузку, на что указывает спектр и величины концентрации основных загрязнителей (мг/дм³): Cu – 0,029; Zn – 0,045; Cd – <0,0005; Hg – 0,00068 в скважине на промплощадке ЗИФ. Фильтрат жидкой фазы материала хвостохранилищ загрязняет подземные воды. В воде наблюдательной скважины установлено загрязнение превышающее значения ПДК: по Hg – от 14 до 59 раз; Cd до 2 раз.

В донных отложениях прудов СЗИФ, вместе с Hg, аккумуляруются: Cu, Zn, Cd, Pb, As.

Дефляция дисперсных частиц хвостов с сухой поверхности хвостохранилищ, обусловлено загрязнением Hg 90% исследованных проб атмосферного воздуха промплощадки СЗИФ и прилегающей территории поселка, кратно превышающим ПДК от 1,3 до 30 (0,009 мг/м³) раз. По данным снеговой съёмки площади 150 га, зона влияния СЗИФ установлена в радиусе 5 км от предприятия; загрязнителями являются Hg, As, Cd, Cu, Zn и др. [1].

Содержащиеся в хвостах токсиканты определяют степень техногенной нагрузки на почвенный слой прилегающих площадей

сельскохозяйственных угодий. В почвах зоны техногенного влияния СЗИФ выявлены следующие предельные уровни концентрации загрязнителей (мг/кг): Hg до 33540; As до 150; Cu до 173; Zn до 219; Pb до 1033,5; Cr до 275. Техногенная нагрузка на 1 м² площади СЗИФ и прилегающей территории поселка выше в 1,7–7,2 раза, чем на 1 м² сельскохозяйственных угодий зоны влияния предприятия.

В почвах приусадебных участков поселка в зоне влияния ЗИФ были выявлены следующие концентрации загрязнителей превышающие соответствующие величины ПДК: Hg – до 1,1; Cu – до 1,1; Zn – до 1,6; Pb – до 32,3; As – до 70; содержание Tl определяется в интервале значений < 1,0–1,7 мг/кг, Se – 0,4–10,9 мг/кг.

Оценка содержания тяжелых металлов в пищевых продуктах местного производства и биосубстратах работников СЗИФ и жителей поселка произведена группой исследователей Уфимского научно-исследовательского института медицины труда и экологии человека.

Для определения уровня поступления Hg и других техногенных загрязнителей в организм жителей поселка было исследовано продовольственное сырьё и пищевые продукты местного производства животного и растительного происхождения. Исследовались продукты, составляющие основной рацион питания местного населения, выращенные на приусадебных участках поселка. В число отобранных 69 проб различных продуктов питания входили: 11 проб молока, 12 проб масла, 6 проб яиц, 40 проб овощей, представленных капустой, свеклой, морковью, луком. Зерновые культуры (пшеница, овес) и горох для анализа отбирались на полях, прилегающих к санитарно-защитной зоне предприятия.

Уровни концентрации Hg, Cu, Pb, Cd и As в горохе, пшенице, овсе, выращенных на сельскохозяйственных угодьях зоны техногенного влияния СЗИФ различны.

В свекле установлены Cd содержания, которого превышают значение ПДК в 1,2 раза и Hg в концентрации превышающей пороговое значение ПДК в 1,1 раза.

Для Hg в моркови, капусте, томатах и зерновых установлены концентрации от 0,0026 до 0,0095 мг/кг, что не превышает гигиенические нормы; вместе с тем в четырех пробах картофеля выявлено превышение уровня ПДК от 1,3 до 2,1 раза.

Исследование содержания Hg в продуктах животного происхождения показало, что наиболее загрязненным является коровье молоко. Минимальное содержание Hg определено на уровне 0,0264 мг/кг, что в 5,3 раза выше соответствующих значений ПДК, максимальные же концентрации загрязнителя 0,0439 мг/кг превышают ПДК в 8,8 раза.

Содержание Hg в куриных яйцах, значительно ниже значения существующего норматива.

Техногенная нагрузка на ОС региона в зонах воздействия различных предприятий горнорудного комплекса проявляется в загрязнении тяжёлыми металлами ряда продуктов местного производства из рациона питания местного населения.

После закрытия СЗИФ научная группа Уфимского НИИ медицины труда и экологии человека провела исследование концентрации Hg в биосубстратах работников предприятия (128 обследованных) и их детей (16 обследованных); исследованиями были охвачены 21,8 % из 660 жителей поселка; практически все трудоспособное население поселка работает или ранее работало на ЗИФ. Определение уровней содержания Hg в биосредах работников ЗИФ и их детей произведено в следующих объемах (пробы): кровь – 144, моча – 16, волосы – 38, зубы – 9, ногти – 40, слюна – 15, грудное молоко кормящих матерей – 2.

Hg обнаружена в крови у всей группы обследованных в концентрациях от 0,00085 до 0,12975 мг/л. Превышение уровня для населения, не подвергшегося воздействию Hg в производственных условиях (0,005 мг/л) выявлено у 57% обследованных взрослых и 31% детей. Известно, что содержание Hg в волосах в период их формирования прямо пропорционально ее концентрации в крови. У всех обследованных жителей поселка и работников ЗИФ Hg в волосах обнаруживается на уровне значений от 0,0100 до 1,4071 мг/кг при среднем 0,29715 мг/кг.

У 100% обследованных работников СЗИФ Hg обнаружена в моче в концентрациях от 0,00103 до 0,0102 мг/л (среднее 0,00442 мг/л). Физиологически допустимый уровень содержания Hg в моче равный 0,005 мг/л не превышен у 68,75% обследованных; на уровне критических значений (0,0075-0,0150 мг/л) токсикант обнаружен у 12,5% обследованных.

В грудном молоке кормящих матерей, проживающих в поселке установлены концентрации Hg в количествах 26,15 и 35,9 мкг/л, что существенно превышает приведенные ВОЗ значения для содержания этого токсиканта в грудном молоке женщин Европы.

Результаты исследований, позволяют использовать Hg в качестве надёжного элемента-трассера для региональной оценки эмиссии и миграции техногенного загрязнения всех компонентов ОС – атмосферы, гидросферы, педосферы, биосферы (включая организм человека) в зонах техногенного воздействия предприятий горнорудного комплекса.

В последнее десятилетие при золотодобыче на территории РБ применяются геотехнологии кучного выщелачивания золота (КВ)

цианированием и подземного выщелачивания (ПВ) хлоринацией. Оценки воздействия на все компоненты ОС процессов КВ и ПВ, даны применительно к условиям размещения предприятий и составу минерального сырья; одним из приоритетных токсикантов для мониторинга состояния ОС является Hg.

Приведённые выше материалы, характеризующие Hg как источник экологических рисков недропользования, могут оказаться полезными при прогнозировании и оценке геолого-экологических рисков как параметров мониторинга в системе горного инжиниринга как традиционных, так и инновационных (КВ, ПВ, бактериальное выщелачивание и др.) технологий освоения как ртутьсодержащих, так и собственно ртутных месторождений РФ.

На месторождениях Таймыра и Кольского полуострова разрабатываемых предприятиями ПАО «ГМК «Норильский никель» ежегодно добывается и перерабатывается порядка 18,5–19,8 млн т сульфидных медно-никелевых руд, в составе которых в техногенную миграцию вовлекается Hg среднее содержание которой оценивается в 1 г/т [4].

В рудах месторождений олова Приморского и Красноярского краёв среднее содержание Hg оценивается величиной 0,1 г/т. В оловянных концентратах месторождений Республики Саха (Якутия) и Забайкалья содержание токсиканта варьируют в широком диапазоне значений от 0,01 до 1,89 г/т, в оловянных концентратах содержащих сульфиды содержания Hg более устойчивы – 0,7–0,8 г/т.

Устойчивые примеси Hg известны в минеральном сырье различных месторождений олова Дальневосточного федерального округа (%): Валькумей (Чукотская АО) от 0,40 до 1,85, в среднем 0,86; Фестивальное (Дальний Восток) – от 1,27 до 2,64, в среднем 1,89; Хрустальное (Приморье) – от 0,98 до 1,87, в среднем 1,34 [3].

ОАО «Новосибирский оловянный комбинат» использует эффективную систему пылеулавливания, позволяющую осадить на фильтрах очистных установок не менее 60% ртути из отходящих газов, однако примерно 5 кг токсиканта всё же поступает в атмосферу.

Выбросы Hg в атмосферу и ее поступление в отходы при добыче и переработке цинка, олова, никеля и меди в РФ по заключению экспертов составили, (в тоннах) [4]:

При производстве цинка: Hg в концентратах – 31; эмиссия в атмосферу – 1,9; Hg в твёрдых отходах помимо хвостов – 8,5; сброс в канализацию – 0,2.

При производстве никеля и меди (предприятия «ГМК «Норильский никель»): Hg в рудах – 24,8; Hg в концентратах – 5,9;

эмиссия Hg в атмосферу – 3,1; Hg в хвостах – 18,9

При производстве олова: Hg в концентратах – 0,01; эмиссия Hg в атмосферу – 0,005.

В связи с принятием Минаматской конвенции возрастает актуальность управления экологическими рисками процессов КВ перспективных ртутьсодержащих месторождений золота так называемого «невадийского» или «карлин-типа» в США, КНР, Иране, РФ и др. Для РС(Я) такой мониторинг потребуется при комплексном освоении КВ золото-ртутного месторождения Кючюс, руды которого содержат от 130 до 500 г/т Hg [2].

Изложенные в сообщении результаты использования Hg в качестве регионального индикатора оценки геолого-экологических рисков недропользования, охарактеризованного на примере разнотипных минеральных месторождений старых горнорудных районов Южного Урала, рекомендуется использовать для формирования оптимальной системы инструментов для прогнозирования и оценки масштабов и контрастности техногенной трансформации компонентов ОС в других регионах РФ. При этом, особое внимание следует уделить территориям нового освоения, начало процесса реализации стратегии оптимального недропользования в пределах которых потребует привлечение всех ресурсов системы современного горного инжиниринга для обеспечения стратегии сырьевой безопасности РФ.

Геоэкологические риски, связанные с Hg в составе минерального сырья и товарной продукции, актуальны практически для всех предприятий газо- и угледобычи ТЭК РФ [6].

Библиографический список

1. *Абдрахманов Р.Ф., Попов В.Г.* Геохимия и формирование подземных вод Южного Урала – Уфа: АН РБ, Гилем, 2010. – 420 с.
2. *Мустафин С.К., Анисимова Г.С.* Геоэкологические проблемы добычи ртути как полезного ископаемого и источника экологических рисков. Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Роль и место мелко- и средне-масштабных геохимических работ в системе геологического изучения недр». Том II. – М.: ИМГРЭ, 2018. – С. 118-119.
3. Оценка поступления ртути в окружающую среду с территории Российской Федерации. План действий Совета Арктики по предотвращению загрязнения Арктики (АСАР/ПДСА), Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору в сотрудничестве с Датским Агентством по охране окружающей среды. ДАООС, Копенгаген, 2005. - 322 с.
4. *Романов А.А., Игнатьева Ю.С., Морозова И.А. и др.* Ртутное загрязнение в России: проблемы и рекомендации. М.: АО «НИИ Атмосфера», Центр «Эко-Согласие», IPEN, 2018. – 104 с.
5. Mercury. Mineral commodity summaries 2021: U.S. Geological Survey. – P. 106-107.
6. *Mustafin S.K., Trifonov A.N., Anisimova G.S., Struchkov K.K.* Mercury as an

indicator of geological and environmental risks in the development of various mineral raw materials. Evolution of Biosphere and Technogenesis (2nd EBT 2021) IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 962 (2022) 012056 IOP Publishing. doi:10.1088/1755-1315/962/1/012056.

MERCURY SAFETY IN THE CONTEXT OF FORECASTING,
ASSESSING AND MONITORING THE GEOLOGICAL AND
ENVIRONMENTAL RISKS OF SUBSOIL USE.

S.K. Mustafin, A.N. Trifonov, G.S. Anisimova, K.K. Struchkov

sabir.mustafin@yandex.ru

Mercury as a toxic pollutant of environmental components requires a quantitative assessment of the scale of emission and migration in the process of technogenic transformation of mining regions. The specific features of the concentration of mercury in natural mineral raw materials, commercial products and processing wastes are characterized by the example of mercury-containing copper pyrite deposits in the Urals. Mercury is used as a reliable element-tracer of the evolution of the technogenic system: mineral raw materials - subsoil waste - environmental components - food products - the human organism. An integrated approach is recommended for optimizing forecasting, assessment and management of geological and environmental risks as tools for geological and environmental monitoring of a modern mining engineering system.

Keywords: Mercury, toxicity, ore, concentrate, waste, environmental pollution.